



Laila Rover Santana

**CONTRIBUIÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DE
PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM
FUNÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2018

Laila Rover Santana

**CONTRIBUIÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DE PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistemas de Biblioteca da UFPA**

Santana, Laila Rover, 1989-
Contribuição à classificação de pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem/ Laila Rover Santana.- 2018.

Orientador: Claudio José Cavalcante Blanco

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2018.

1. Bacias hidrográficas 2. Drenagem 3. Recursos hídricos
I. Título

CDD 22.ed. 551.48



CONTRIBUIÇÃO À CLASSIFICAÇÃO DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM

AUTORA:

LAILA ROVER SANTANA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL.

APROVADO EM: 25 / 05 / 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil Junior
Membro Externo (UnB)

Prof. Dr. Francisco Carlos Lira Pessoa
Membro Interno (UFPA)

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Ubirajara, pela sua incansável ajuda e cobrança nos estudos, pelo seu incentivo, amor e carinho, tornando-me uma pessoa capaz de lutar em busca dos meus sonhos e objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por suas bênçãos e infinito amor.

Agradeço à Santa Terezinha do Menino Jesus, que por vezes invoquei pedindo bênçãos e força para conclusão deste trabalho.

Aos meus avós Rubem e Eneida (*in memoriam*), onde quer que estejam.

Aos meus familiares, pelo amor e incentivo em todos os momentos de minha vida, em especial aos meus pais Vânia e Ubirajara, aos meus tios Fátima, Goretti e Jorge, à minha “mãedrastra” Neia e aos meus primos-irmãos Tom e Priscilla.

Aos meus irmãos, que são minha força e inspiração diária, que me incentivam e me alegram.

Ao Júnior, pelo amor, carinho, apoio e compreensão.

Ao meu orientador, professor Claudio José Cavalcante Blanco, por ter acreditado em mim e no meu potencial, por toda compreensão, auxílio e orientação neste trabalho.

Aos professores do Programa de Mestrado em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPA, pelos ensinamentos, que contribuíram à minha formação profissional.

Às minhas amigas da graduação Lariana, Jime e Laila, pelo carinho, incentivo e apoio.

Aos amigos que conheci no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPA, em especial aos da turma de 2014, Carlos Eduardo, Roberto Correa, Calina Barros e Pablo Oliveira, que estiverem ao meu lado desde o início, me incentivando e me dando forças nos momentos de fraqueza.

Às minhas queridas “Pibiquetes”, Adri, Juliana, Fabíola e Lilian por todo carinho, preocupação, incentivo e apoio.

Aos meus amigos Yashmin Keiller, Evanice Gomes, Vanessa Santos, Artur Abreu, Diêgo Crispim, Vanessa Watrin e Bruna Lira, pelo carinho e apoio.

Aos demais amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e do Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da UFPA, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

A todos aqueles que não foram citados, mas que também contribuíram direta e indiretamente para que eu concluísse o mestrado. Os meus mais sinceros agradecimentos!

“A força não provém da capacidade física. Provém de uma vontade indomável”.

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

A adoção de um valor de área para definir grandes, médias ou pequenas bacias hidrográficas deve levar em consideração os diversos processos envolvidos no comportamento das bacias. Em pequenas bacias, os fenômenos de conversão chuva-vazão são descritos utilizando técnicas mais simples. Buscando classificar pequenas bacias hidrográficas em função de suas áreas de drenagem, o estudo teve como principal objetivo identificar e classificar as pequenas bacias da Amazônia Legal, utilizando um modelo linear simples (MLS). O modelo é aplicado aos dados de chuva e vazão de bacias testes selecionadas, a fim de verificar a linearidade entre essas variáveis. O MLS utilizado neste estudo é baseado em um sistema linear e invariável no tempo, que estabelece uma relação de causa e efeito entre os dados de chuva e vazão. O desempenho do modelo foi avaliado através do *RMS* (raiz quadrada do erro quadrático médio), e a partir dos resultados pequenas bacias hidrográficas foram classificadas em função da área de drenagem. O método de Otto Pfafstetter é aplicado buscando identificar em que nível de codificação são encontradas apenas pequenas bacias hidrográficas. Os resultados indicaram que nas bacias com áreas de drenagem menores ou iguais a 620 km² o ajuste entre as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas foi melhor, apresentando valores de *RMS* abaixo de 3 m³/s. Já nas bacias com dimensões acima de 620 km², os resultados de *RMS* ultrapassaram 4 m³/s, e as curvas de permanência não apresentaram bom ajuste, demonstrando que o MLS falha quando aplicado aos dados hidrológicos dessas bacias. Assim, as pequenas bacias hidrográficas da Amazônia Legal foram classificadas com áreas de drenagem menor ou igual a 620 km². O método de Ottocodificação foi aplicado até o nível 9, onde foram delimitadas 51.319 ottobacias, todas classificadas como pequenas bacias.

Palavras-Chave: Bacias Hidrográficas; Linearidade; MLS; Ottocodificação.

ABSTRACT

The adoption of an area value to define large, medium or small river basins should take into account the various processes involved in the basin behavior. In small basins, rainfall-flow conversion phenomena are described using simpler techniques. In order to classify small river basins according to their drainage areas, the main objective of this study was to identify and classify the small basins of the Amazon using a simple linear model (MLS). The model is applied to the rainfall and flow data from selected test basins in order to verify the linearity between these variables. The MLS used in this study is based on a linear and time invariant system that establishes a cause and effect relationship between rainfall and flow data. The performance of the model was evaluated through the RMS (square root of the mean square error), and from the results, small hydrographic basins were classified as a function of the drainage area. The method of Otto Pfafstetter is applied searching to identify at what level of codification are found only small river basins. The results indicated that in the basins with drainage areas less than or equal to 620 km², the adjustment between the observed and simulated flow duration curves was higher, presenting RMS values below 3 m³ / s. In the basins with dimensions over 620 km², the RMS results exceeded 4 m³ / s, and the flow duration curves did not present a good fit, demonstrating that the MLS fails when applied to the hydrological data of these basins. Thus, the small hydrographic basins of the Amazon were classified with areas of drainage less or equal to 620 km². The Ottocoding method was applied until level 9, where 51,319 ottobacias were delimited, all classified as small basins.

Keywords: River Basins; Linearity; SLM; Ottocodification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes principais de uma bacia hidrográfica.....	11
Figura 2 - Modelos de hierarquia fluvial conforme Horton (A), Strahler (B), Scheidegger (C) e Shreve (D).....	14
Figura 3 – Codificação e classificação das bacias hidrográficas segundo Pfafstetter (1989) ..	18
Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo: Amazônia Legal.....	23
Figura 5 – Bacias hidrográficas da Amazônia Legal.....	24
Figura 6 – Mapa dos biomas da Amazônia Legal	25
Figura 7 - Mapa da cobertura vegetal da Amazônia Legal.....	26
Figura 8 – Mapa de solos da Amazônia Legal.	27
Figura 9 – Mapa de distribuição do relevo na Amazônia Legal.....	28
Figura 10 – Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.	30
Figura 11 – Mapa de localização das estações pluviométricas e fluviométricas na área de estudo.	31
Figura 12 - Fluxograma de etapas do algoritmo aplicado ao MLS.	36
Figura 13 - Relação entre a área de drenagem e o <i>RMS</i> da calibração de cada BT.....	43
Figura 14 - Hidrogramas diários e curvas de permanência da validação do MLS nas bacias testes.	44
Figura 15 - Relação entre a área de drenagem e o <i>RMS</i> da validação de cada BT.....	52
Figura 16 – Ottocodificação da Ana aplicada às bacias hidrográficas da Amazônia Legal.....	54
Figura 17 – Níveis da Ottocodificação aplicada às bacias hidrográficas da Amazônia Legal.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados pluviométricos e fluviométricos das BT utilizados no MLS.	40
Tabela 2 - Parâmetros de calibração para cada BT.	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BT	Bacia Teste
CBH	Comitês de Bacias Hidrográficas
m	Comprimento da Resposta Impulsional
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
k	Decalagem
$\delta_{Q_o Q_s}$	Distância Métrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDEHC	Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes
MLS	Modelo Linear Simples
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
RMS	Raiz Quadrada do Erro Quadrático
h	Resposta Impulsional do Sistema
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
Q_o	Vazão Observada
Q_s	Vazão Simulada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.1 Geral.....	9
1.1.2 Específicos.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE TERRITORIAL DE ANÁLISE.....	10
2.1.1 Análises Morfométricas de Bacias Hidrográficas.....	11
2.2 CODIFICAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS PELO MÉTODO DE OTTO PFAFSTETTER.....	15
2.2.1 A Metodologia de Otto Pfafstetter.....	16
2.2.2 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	18
2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	19
2.3.1 Classificação dos Modelos.....	20
2.3.2 Modelo Linear Simples (MLS).....	21
3. ÁREA DE ESTUDO	23
3.1 HIDROGRAFIA.....	23
3.2 VEGETAÇÃO.....	25
3.3 CLIMA.....	26
3.4 SOLO E RELEVO.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1 BACIAS TESTES.....	31
4.2 MODELO LINEAR SIMPLES – MLS.....	32
4.2.1 Determinação da Resposta Impulsional.....	32
4.2.2 Transformada Inversa de Fourier Discreta.....	34
4.2.3 Convolução Discreta para Sistemas com Memória Finita.....	35
4.2.4 Critérios de Desempenho.....	36
4.2.5 Calibração e Validação do Modelo.....	37
4.3 SISTEMA DE OTTOCODIFICAÇÃO.....	38
4.3.1 Obtenção do MDEHC.....	38
4.3.2 Ottocodificação.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	40

5.2 OTTOCODIFICAÇÃO DAS PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	53
6. CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICE I - DADOS DAS BACIAS TESTES E DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NO ESTUDO	66
APÊNDICE II – CURVAS DA OTIMIZAÇÃO DO COMPIMENTO m DA RESPOSTA IMPULSIONAL DO Modelo LINEAR SIMPLES.....	68
APÊNDICE III – HIDROGRAMAS DIÁRIOS E CURVAS DE PERMANÊNCIA DA CALIBRAÇÃO DO MLS NAS BACIAS TESTES.....	73

1. INTRODUÇÃO

A gestão adequada dos recursos hídricos é um assunto que vem sendo muito discutido, pois a preocupação com a disponibilidade hídrica para as gerações atuais e futuras vem aumentando devido às frequentes notícias sobre poluição hídrica e seca de mananciais.

Para Swarowsky *et al.* (2011), a variabilidade das chuvas vem provocando períodos de secas e enchentes em diversas regiões do planeta, gerando impactos na produtividade industrial e de alimentos, causando enchentes e propagando doenças de veiculação hídrica. Por isso, se faz necessário o entendimento da bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental.

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei nº 9.433/1997, definiu a bacia hidrográfica como unidade territorial básica à gestão dos recursos hídricos. Anos depois, com a necessidade de um sistema único de classificação das bacias, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) adota a metodologia desenvolvida pelo engenheiro Otto Pfafstetter como a codificação oficial das bacias hidrográficas brasileiras.

A bacia hidrográfica é uma das unidades territoriais mais adotadas nos estudos ambientais, sobretudo aos que se referem à gestão dos recursos hídricos. Contudo, a hidrologia ainda não possui um sistema de classificação global para sua principal unidade de interesse, a bacia (WAGENER *et al.*, 2007). Teodoro *et al.* (2007) destacam a importância de gestores e pesquisadores compreenderem o conceito de bacia hidrográfica e suas subdivisões. Na literatura são encontradas diversas definições para bacia hidrográfica, nas quais os autores adotam conceitos bem semelhantes para definir essa unidade territorial. Entretanto, essa semelhança não é encontrada nas definições das subdivisões da bacia, apresentando conceitos diferentes que abrangem fatores que vão do físico ao ecológico.

Os termos sub-bacia e microbacia são os mais utilizados nas subdivisões da bacia hidrográfica, contudo, existem divergências quanto à definição desses termos. Segundo Machado e Torres (2012), a diferenciação desses termos é realizada, seguindo um grau de hierarquização, na qual a bacia hidrográfica é a área drenada pelo rio principal, a sub-bacia é a área drenada por um tributário do rio principal, e a microbacia é a área drenada por um tributário de um tributário do rio principal. É importante destacar que os conceitos de bacia e suas ramificações, em sua grande maioria, não incluem o tamanho da área drenada. A adoção de um valor de área para definir uma grande ou uma pequena bacia deve levar em consideração os diversos processos envolvidos no comportamento da bacia hidrográfica.

Com bases hidrológicas, Lima (1996) classifica as bacias hidrográficas em grandes e pequenas, levando em consideração não só as dimensões da superfície total, mas também os

efeitos de fatores causadores do escoamento superficial, como as chuvas de alta intensidade (curta duração) e o uso do solo (cobertura vegetal). Assim, levando em consideração esses fatores, as alterações no escoamento superficial são identificadas com mais sensibilidade nas pequenas bacias do que nas grandes.

A definição do tamanho de uma pequena bacia hidrográfica requer atenção, pois segundo Goldenfum (2003), sempre apresenta algum grau de subjetividade, uma vez que as características físicas de cada bacia (solo, vegetação e topografia) não permitem que seja aplicado um valor único a todas as situações. Segundo Ponce (1989), para uma bacia hidrográfica ser considerada pequena ela deve apresentar algumas propriedades como, por exemplo, a duração das chuvas ultrapassar o tempo de concentração da bacia. Essas propriedades fazem com que os fenômenos de conversão chuva-vazão em pequenas bacias possam ser descritos utilizando técnicas mais simples. Neste sentido, a motivação do presente trabalho está na identificação de valores que classifiquem pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem.

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta para simulação de diferentes cenários na bacia hidrográfica. Para Vema et al. (2017) e Tucci (2005), o modelo hidrológico ajuda a compreender e a representar a dinâmica da bacia, prevendo condições diferentes das observadas e contribuindo para tomada de decisões no planejamento e gestão de recursos hídricos. Diversos modelos estão disponíveis, distinguindo-se conforme os objetivos desejados, as variáveis de entrada e informações de saída do sistema, tentando reproduzir o ambiente físico de forma real. No estudo, será utilizado um Modelo Linear Simples (MLS), buscando observar a linearidade entre os processos chuva- vazão. As hipóteses desse modelo implicam que toda chuva que cai sobre a bacia é, aproximadamente, igual ao volume total escoado. Em pequenas bacias a relação de linearidade entre os dados de chuva e vazão é favorecida, conforme descrevem estudos realizados por Blanco *et al.* (2013).

Buscando definir o tamanho da área de drenagem de uma pequena bacia hidrográfica, o presente estudo tem como principal objetivo identificar e classificar as pequenas bacias da Amazônia Legal utilizando um MLS. A codificação de Otto Pfafstetter será aplicada para identificar em que nível de ramificação serão encontradas apenas pequenas bacias, buscando facilitar e simplificar a procura por essas unidades hidrográficas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Classificar as bacias hidrográficas da Amazônia Legal em função da área de drenagem, identificando as pequenas bacias através de modelo linear chuva-vazão e do método de codificação de Otto Pfafstetter.

1.1.2 Específicos

- Identificar as pequenas bacias hidrográficas através de modelo linear chuva-vazão;
- Classificar as pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem;
- Aplicar o método de codificação de Otto Pfafstetter e identificar em que nível são encontradas apenas pequenas bacias hidrográficas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

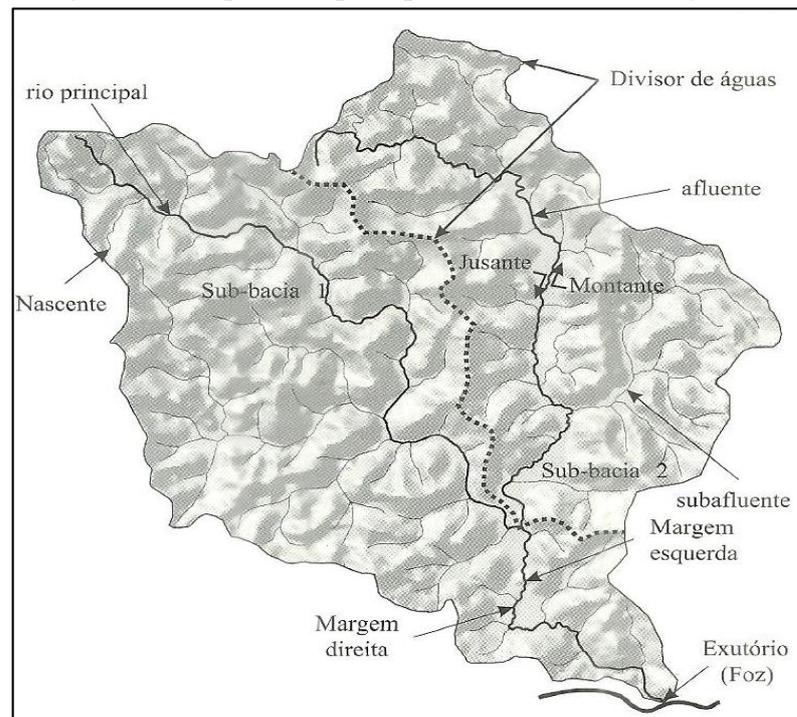
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE TERRITORIAL DE ANÁLISE

A bacia hidrográfica é uma importante unidade territorial nos estudos ambientais, em especial na gestão dos recursos hídricos. Para Albuquerque e Souza (2016), a bacia hidrográfica é a entidade geográfica mais adequada para análise de sistemas ambientais, uma vez que em sua morfologia são agregadas as ações da natureza e da sociedade. Importantes para a distribuição das águas superficiais, as bacias também exercem uma função relevante na distribuição de sedimentos e substâncias dissolvidas (COELHO NETTO, 2005).

A literatura apresenta diversas definições para bacias hidrográficas, mas em geral tendem a caracterizá-las quanto à sua área de captação. Segundo Tucci (2004), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, o exutório. Para Guerra (2011), bacia hidrográfica é o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, devendo incluir naturalmente a existência de cabeceiras ou nascentes, divisores de água, cursos d'água principais afluentes e subafluentes. Em hidrologia, Liu (2015) define bacia hidrográfica como a unidade lógica para estudar o movimento da água dentro do ciclo hidrológico, uma vez que grande parte da água que sai no exutório da bacia se origina da precipitação que cai dentro dela.

A bacia hidrográfica apresenta como principais componentes: o rio principal, que é a maior linha de fluxo de água, ligando nascente à foz; os afluentes, que são drenos secundários que conduzem a água diretamente ao rio principal; e os subafluentes, que são os rios que convergem para os afluentes (CRUZ; TAVARES, 2009). Os divisores de águas são linhas separadoras das águas pluviais em diferentes bacias hidrográficas (Figura 1).

Figura 1 - Componentes principais de uma bacia hidrográfica



Fonte: Machado e Torres (2012).

As características físicas e bióticas de uma bacia possuem um importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, entre outros, a infiltração, a evapotranspiração e a quantidade de água produzida com os escoamentos superficial e subterrâneo. Essas características em conjunto com o uso do solo e as atividades realizadas em uma bacia hidrográfica, definem a quantidade e a qualidade da água (TONELLO, 2005).

2.1.1 Análises Morfométricas de Bacias Hidrográficas

O uso e manejo adequados dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica exigem estudos minuciosos das características da bacia. Segundo Machado e Torres (2012), é fundamental entender as interações que ocorrem entre os vários elementos da bacia, como a dinâmica das drenagens superficiais, os elementos da topografia local, as características físicas e as intervenções da sociedade.

A análise morfométrica é uma ferramenta frequentemente utilizada nesses estudos, pois permite estabelecer uma relação entre as características fisiográficas e o comportamento da dinâmica hidrográfica/ambiental de uma bacia hidrográfica (LIMA et al., 2010). Segundo Villela e Mattos (1975), as características físicas de uma bacia são componentes fundamentais para avaliação do seu comportamento hidrológico, pois ao se estabelecerem relações e comparações entre tais características e os dados hidrológicos conhecidos, pode-se determinar indiretamente valores hidrológicos em regiões onde esses dados são escassos.

O objetivo da aplicação de parâmetros morfométricos é a compreensão do arranjo e da distribuição de certos elementos na paisagem das bacias hidrográficas, como a declividade, a topografia, a condição do solo e o escoamento superficial, características importantes para o planejamento de bacias hidrográficas (CHEREM, 2011; ANGILLIERI, 2012; CHANDRASHEKAR et al., 2015). As características físicas, sobretudo aquelas associadas ao relevo, à forma e à rede de drenagem, estão diretamente relacionadas ao tempo e à velocidade de escoamento da água na bacia, o que pode causar maior ou menor infiltração da água no solo (LEAL; TONELLO, 2017).

A caracterização morfométrica é um dos procedimentos mais comuns e necessários nas análises hidrológicas ou ambientais de uma bacia hidrográfica (MARINHO, 2011). Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e as técnicas de geoprocessamento são ferramentas fundamentais para essas análises em bacias hidrográficas, uma vez que possuem uma abordagem múltipla e agregam velocidade e precisão aos resultados de estudos ambientais (ALTAF et al., 2013; FONSECA et al., 2013; ALVES et al., 2014; BRUNO, 2017). Christofolletti (1980) sugeriu que os índices e parâmetros para a análise morfométrica fossem abordados em quatro itens: hierarquia fluvial, análise areal, análise linear e análise hipsométrica. A ordenação dos canais fluviais é o primeiro passo para a realização da análise morfométrica.

Hierarquia Fluvial

A hierarquia fluvial é o processo em que se determina a classificação de determinado curso d'água (ou da área drenada que lhe pertence) no conjunto total da bacia hidrográfica na qual se encontra (CHRISTOFOLETTI, 1980). De acordo com Machado e Torres (2012), a ordem dos rios reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia hidrográfica. Os sistemas usualmente utilizados para o ordenamento dos cursos d'água são os de Horton (1945), de Strahler (1952), de Scheidegger (1965) e o de Shreve (1966; 1967).

Horton (1945) estabelece que os canais de primeira ordem são aqueles que não possuem tributários; enquanto os de segunda ordem recebem apenas tributários de primeira ordem; os rios de terceira ordem podem receber um ou mais tributários de segunda ordem e também de primeira ordem; já os de quarta ordem recebem tributários de terceira ordem e os de ordem inferior, e assim por diante. Os critérios de classificação utilizados por Horton definem que o rio principal terá o mesmo número de ordem em toda sua extensão (Figura 2A).

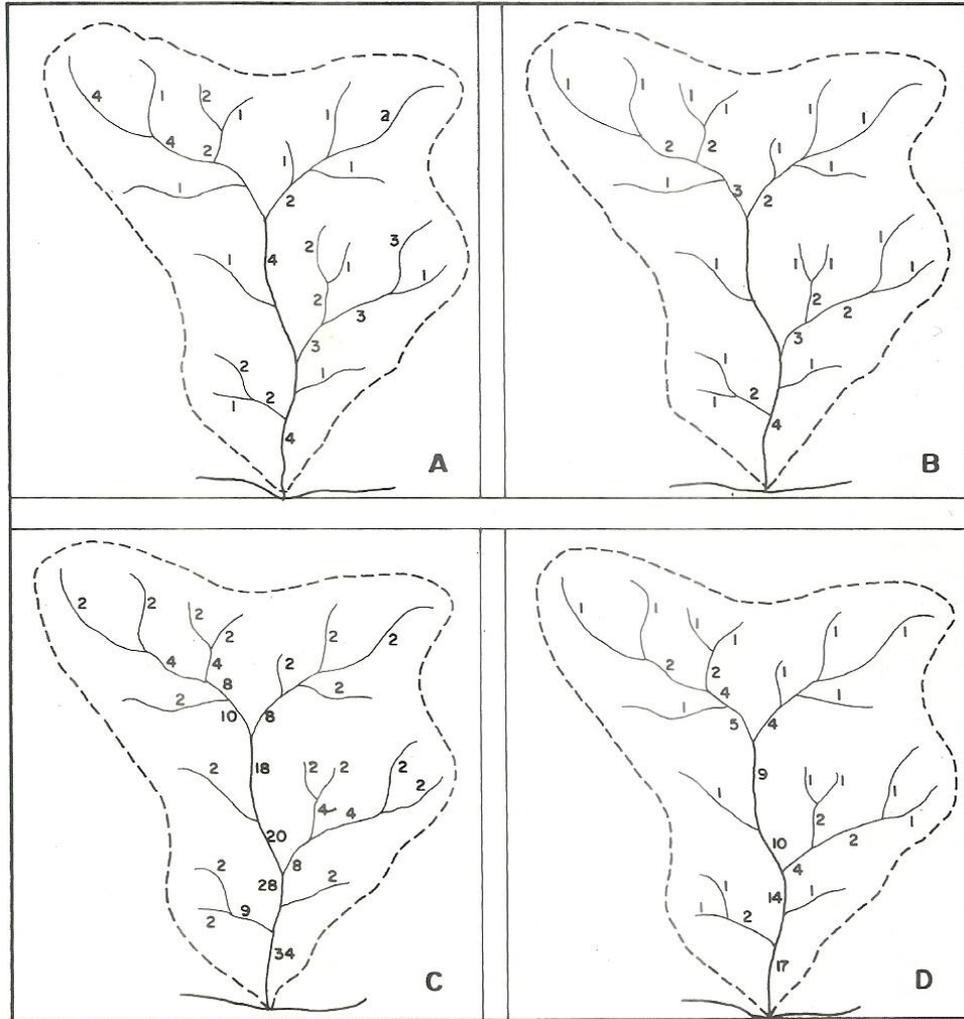
Strahler, em 1952, instituiu um sistema de ordenamento de canais diferente do proposto por Horton, onde os canais sem tributários são os de primeira ordem e estendem-se da nascente

até a confluência (lugar onde dois canais encontram-se); os canais de segunda ordem recebem somente tributários de primeira ordem e surgem da confluência de dois canais de primeira ordem; os rios de terceira ordem surgem do encontro de dois canais de segunda ordem, podendo receber tributários de segunda e de primeira ordem; os de quarta ordem podem receber tributários das ordens inferiores e nascem do encontro de dois canais de terceira ordem (CHRISTOFOLETTI, 1980). Ao contrário da proposta de Horton, a de Strahler considera que o número de ordem do rio principal varia conforme a classificação dos cursos d'água (Figura 2B).

Outro sistema de hierarquização proposto foi o de Scheidegger, em 1965, denominado de *método de ordenação dos canais uniformes*. De acordo com esse sistema, para cada canal de primeira ordem (que não recebe tributário) é atribuído o valor numérico 2, e a cada confluência somam-se os valores atribuídos aos canais. Ao final da classificação, encontra-se o valor da última conexão da bacia, e se este valor for dividido por 2 (valor atribuído a cada uma das nascentes), encontra-se o número de nascentes contribuintes para formar o rio principal (CHRISTOFOLETTI, 1980) (Figura 2C).

A ordenação fluvial de Shreve define a magnitude de um ligamento (trecho de canais que não recebem afluentes) ou de uma bacia hidrográfica. Os ligamentos exteriores (canais que se estendem desde a nascente até uma confluência) têm magnitude 1. O encontro de dois ligamentos resulta em um ligamento com valor final igual à soma das magnitudes dos canais confluentes. No sistema de Shreve, a magnitude de um canal representa o número total de nascentes que lhe são tributárias (CHRISTOFOLETTI, 1980) (Figura 2D).

Figura 2 - Modelos de hierarquia fluvial conforme Horton (A), Strahler (B), Scheidegger (C) e Shreve (D).



Fonte: Christofolletti (1980).

Análise Linear

A análise linear engloba os índices e as relações a cerca da rede hidrográfica, onde as medições necessárias são realizadas ao longo das linhas de escoamento (CHRISTOFOLETTI, 1980). Referente a este tipo de análise, destaca-se o comprimento do rio principal, definido como a distância que se estende ao longo do curso d'água, desde a foz até sua nascente.

Análise Areal

A análise areal analisa os índices provenientes de medições planimétricas e lineares das bacias hidrográficas (CHRISTOFOLETTI, 1980). Entre os parâmetros avaliados neste tipo de análise estão: a área da bacia, a forma da bacia e a densidade de drenagem.

Para Christofolletti (1980), a área da bacia “é toda a área drenada pelo conjunto do sistema fluvial, projetada em plano horizontal”. A área é o elemento básico à quantificação de

parâmetros e grandezas fisiográficas e hidrológicas de uma bacia, e pode ser calculada por planimetria direta em mapas e cartas ou com o auxílio de SIGs (MELLO; SILVA, 2013).

Conforme Machado e Torres (2012), as grandes bacias hidrográficas apresentam o formato de uma pêra, enquanto pequenas bacias apresentam formas variadas que dependem de diversos fatores, principalmente da estrutura geológica da região. Existem vários índices que determinam a forma de uma bacia, destacando-se o índice de circularidade (I_c) e o fator de forma (K_f). O índice de forma descreve o formato superficial da bacia, indicando a susceptibilidade a enchentes. Bacias mais circulares apresentam maior risco de enchentes, enquanto que nas bacias mais alongadas esse risco diminui. As bacias de formas retangulares, trapezoidais ou triangulares apresentam menor tendência para enchentes, visto que o escoamento gerado pela precipitação é bem distribuído no canal principal (ROCHA; KURTZ, 2001; ALVES et al., 2014).

A densidade da drenagem (D_d) correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia hidrográfica (CHRISTOFOLETTI, 1980). Através da densidade de drenagem é possível conhecer o potencial do escoamento superficial na bacia e em suas seções, bem como o potencial de produção e transporte de sedimentos (SOUSA, OLIVEIRA, 2017).

Análise Hipsométrica

A análise hipsométrica indica a proporção ocupada por determinada área da superfície terrestre em relação às variações altimétricas a partir de uma curva de nível base (CHRISTOFOLETTI, 1980). Segundo Mendonça (2013), esta análise inclui as altitudes, a amplitude do relevo e atributos da rede de drenagem da bacia hidrográfica. A amplitude altimétrica máxima da bacia (H_m) e o índice de rugosidade (I_r) são alguns dos parâmetros utilizados na análise hipsométrica da bacia. O primeiro é a diferença altimétrica entre a altitude do exutório e a altitude do ponto mais alto do divisor topográfico, enquanto o segundo é definido pelo produto entre a amplitude altimétrica (H_m) e a densidade de drenagem (D_d) (CHRISTOFOLETTI, 1980).

2.2 CODIFICAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS PELO MÉTODO DE OTTO PFAFSTETTER

Instituída pela PNRH, Lei nº 9.433/97, como unidade territorial para a atuação de sistemas de gerenciamento de recursos hídricos, a bacia hidrográfica é uma importante unidade de gestão de elementos naturais e sociais. Para Fontes e Pejon (2008), as bacias hidrográficas representam

áreas delimitadas onde existem conexões entre os diversos elementos físicos e as atividades humanas.

No Brasil, importantes órgãos utilizam diferentes sistemas de classificação e codificação de bacias hidrográficas (GALVÃO; MENESES, 2005), contudo a codificação proposta pelo engenheiro Otto Pfafstetter, do antigo Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), destaca-se como sendo um sistema natural e hierárquico de classificação, que toma como base o tamanho e a forma da bacia hidrográfica, bem como a configuração dos canais que produzem o escoamento até o exutório (VERDIN; VERDIN, 1999).

O sistema desenvolvido por Otto Pfafstetter, conhecido como “ottobacias”, associa um código único para cada bacia, que são organizadas em uma estrutura hierárquica. Segundo Silva (1999), é um método natural, baseado na topografia da área drenada e na topologia (conectividade e direção) da rede de drenagem. Apresenta como características principais a economia de dígitos, informação topológica embutida nos códigos e aplicabilidade global. Para Galvão e Menezes (2005), através do código de cada bacia é possível deduzir quais bacias hidrográficas localizam-se a montante e a jusante daquela em estudo.

Visando as vantagens do sistema de ottobacias e a necessidade em se definir bases à implantação da PNRH e seus instrumentos, o CNRH, através da Resolução nº 30, de 11 de dezembro de 2002, adotou o método de Otto Pfafstetter como o sistema oficial de codificação das bacias hidrográficas brasileiras. A Agência Nacional de Águas (ANA) e o Serviço Geológico Americano (United States Geological Survey - USGS) utilizam este método para codificar as bacias hidrográficas.

2.2.1 A Metodologia de Otto Pfafstetter

A codificação de Otto Pfafstetter, também chamada de “Ottocodificação”, baseia-se nas seguintes regras: a delimitação das bacias é feita a partir da identificação do rio principal, e posteriormente, codificam-se suas bacias afluentes por área de contribuição. Segundo Pfafstetter (1989), o rio principal deve ser o que possuir maior deflúvio anual, no entanto este tipo de análise demandaria estudos de longos históricos de vazões, o que nem sempre é possível. No entanto, ele ressalta que em geral os deflúvios anuais dos rios são proporcionais às suas áreas de drenagem, e por isso para a aplicabilidade do seu método de codificação, estabeleceu a área drenada como principal critério de identificação do rio principal.

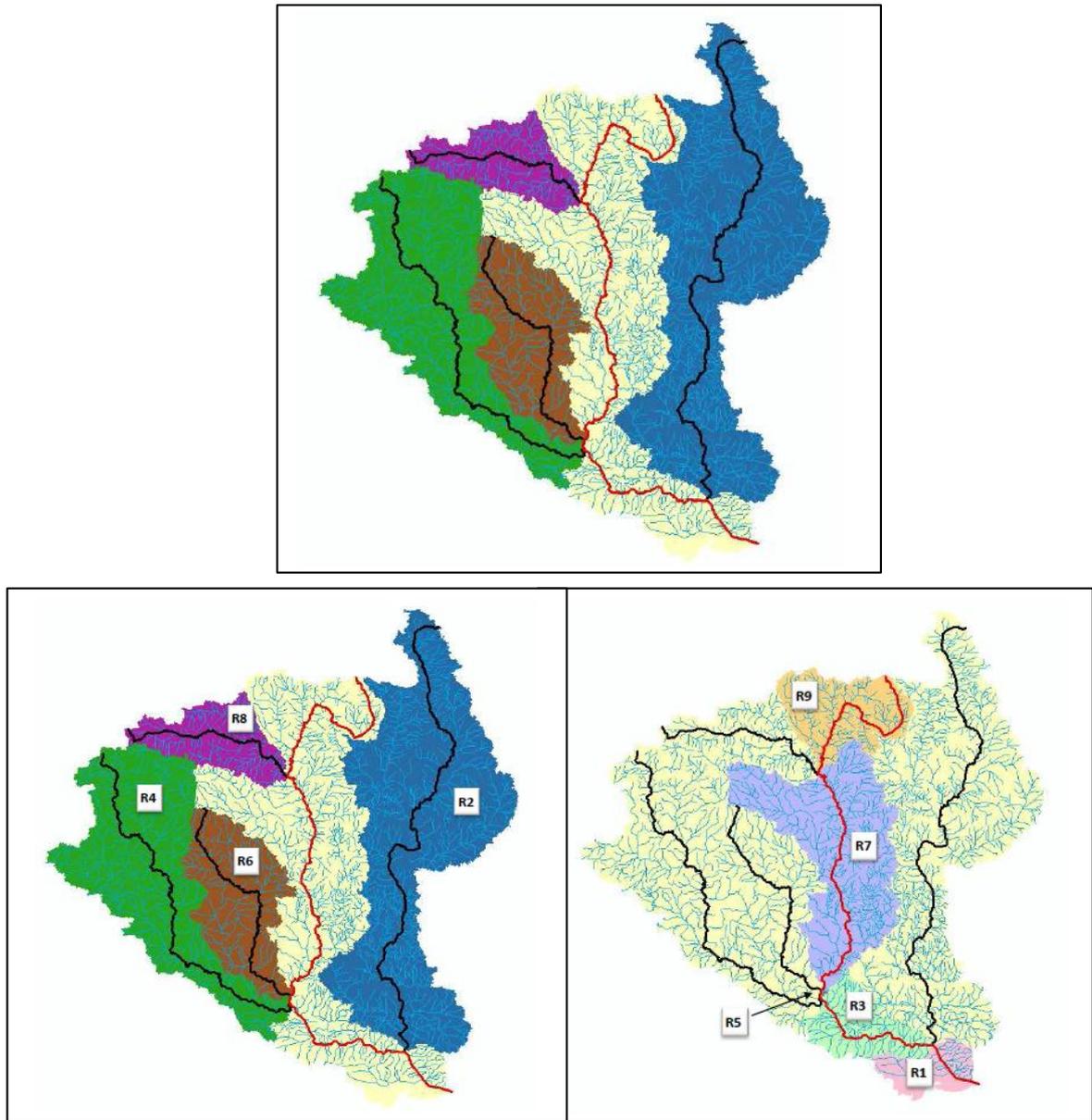
Em qualquer nível de classificação separam-se as quatro maiores bacias identificadas ao longo do rio principal, as quais receberão como código, em ordem de jusante para montante, os números pares 2, 4, 6 e 8. O código 0 (zero) é atribuído para a maior bacia fechada. As bacias

restantes são denominadas de “interbacias” e são divididas em cinco áreas que recebem como códigos os números ímpares 1, 3, 5, 7 e 9, também atribuídos de jusante para montante. Ao final da codificação, a configuração das bacias encontra-se de forma que a interbacia 3 se localiza entre as bacias 2 e 4, a interbacia 5, entre as bacias 4 e 6, e assim por diante.

Como exemplo, aplicou-se a Ottocodificação à bacia do rio Trombetas, utilizando o *R* como código inicial, acrescentando à sua direita os dígitos pares e ímpares conforme o método de Pfafstetter (1989). A codificação inicia-se pela identificação do rio principal, para em seguida determinar as quatro maiores bacias em área de drenagem, atribuindo os dígitos pares 2, 4, 6 e 8 ao final do *R*, de jusante à montante do rio principal. Assim, têm-se as bacias R2, R4, R6 e R8. Igualmente, identifica-se as interbacias, adicionando os números ímpares 1, 3, 5, 7, e 9 à direita do código *R*, resultando nas bacias R1, R3, R5, R7 e R9 (Figura 3). O processo de subdivisão das bacias e das interbacias pode ser realizado quantas vezes for necessário em vários níveis, desde que o detalhamento da base cartográfica permita. A interpretação dos códigos é simples, sendo necessário conhecer algumas regras como, por exemplo, para uma bacia, o último algarismo diferente de zero é sempre par, enquanto que para uma interbacia, o número é sempre ímpar (PFAFSTETTER, 1989).

O sistema de ottobacias pode ser aplicado para rios continentais a cursos d'água locais, desde que o nível de detalhamento desejado permita. Além disso, o método possibilita o uso de SIG para aplicação automática da codificação de bacias (FONTES; PEJON, 2008). Em SIG, os dados de relevo são representados por Modelos Digitais de Elevação (MDE) e sua posterior consistência hidrológica, os Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes (MDEHC) possibilitam que as delimitações das ottobacias sejam realizadas com maior precisão, pois consideram a altimetria do terreno em suas etapas de processamento (RIBEIRO et al., 2002).

Figura 3 – Codificação e classificação das bacias hidrográficas segundo Pfafstetter (1989)



Fonte: ANA, 2012.

2.2.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

As bacias hidrográficas podem ser delimitadas manual ou automaticamente, no entanto com o surgimento de novas geotecnologias, como os SIG, as técnicas automatizadas são mais vantajosas, pois apresentam maior rapidez, maior precisão, diminuição de custos e de tempo.

Em SIG, as superfícies do terreno são representadas por MDE, o qual é aplicado em muitas áreas da ciência. Em hidrologia, as informações de drenagem, como direção do fluxo das águas, segmentos das redes fluviais, bacias e sub-bacias hidrográficas podem ser extraídas de MDE (TURCOTTE, 2001; FREITAS et al., 2016). O MDE representa a variação do terreno,

e sua estrutura de dados pode ser representada através da Grade Retangular de Pontos (GRID) ou de Redes Triangulares Irregulares (TIN). Segundo Sobrinho (2010), o MDE pode ser obtido através da “interpolação de curvas de nível extraídas de uma carta topográfica ou através de imagens de sensores remotos”. Menke (2012) ressalta que os MDE podem apresentar erros na consistência hidrológica do terreno, uma vez que a maioria dos algoritmos utilizados para interpolar dados de elevação não consideram os canais fluviais.

A delimitação de bacias hidrográficas contém áreas planas ou pixels de depressão, os quais podem ser representações artificiais ou reais da paisagem, e estas feições podem interferir no cálculo do fluxo da drenagem através do MDE (PAN et al., 2012; PETROSELLI, ALVAREZ, 2012; ARNOLD, 2010). Por isso, em estudos hidrológicos deve-se utilizar o MDEHC, pois este modelo possui como parâmetros básicos a direção do fluxo e a área de contribuição, respeitando o traçado da área mapeada. Segundo o *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) (1997), MDEHC pode ser definido como “a representação digital do relevo capaz de reproduzir, com precisão, o caminho preferencial do escoamento superficial da água observado no mundo real”.

Os MDEHC permitem que as delimitações das bacias sejam realizadas com maior precisão, pois consideram os dados altimétricos do terreno em suas etapas de processamento. Esses modelos também apresentam uma coincidência acentuada entre a rede de drenagem derivada numericamente e a hidrografia real, estando isentos de depressões espúrias que bloqueiem o trajeto do escoamento superficial (HUTCHINSON, 1989; RIBEIRO *et al.*, 2005).

2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

A hidrologia aborda as inter-relações ligadas aos fenômenos naturais encontrados no ciclo hidrológico e a compreensão sobre os processos hidrológicos é fundamental em estudos ambientais, na gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas. A modelagem hidrológica apresenta-se como uma importante ferramenta para obtenção de conhecimento a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários (MORAES, 2003).

As medidas hidrológicas como a precipitação, a evaporação, a infiltração e o escoamento fluvial dependem de inúmeros fatores que dificultam as análises quantitativa e qualitativa dessas medidas. A alta variabilidade espaço-temporal da precipitação e das características das bacias hidrográficas torna a relação chuva-vazão complicada, difícil de ser avaliada. Neste contexto, os modelos hidrológicos são ferramentas bastante utilizadas, pois simulam melhor os processos chuva-vazão (KUMAR et al., 2005; ANDREWS et al., 2011). Os modelos

hidrológicos também estão sendo amplamente utilizados para avaliar os impactos do clima e do uso da terra na quantidade e qualidade dos recursos hídricos, mostrando-se essenciais na previsão e quantificação dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza (MORIASI et al., 2012; ALMEIDA; SERRA, 2017).

Tucci (2005) define modelo como “a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”. O modelo hidrológico apresenta-se como uma ferramenta de análise dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, podendo prever situações diferentes das que foram observadas. Os modelos matemáticos, que utilizam um conjunto de equações matemáticas para simular o comportamento de um sistema, são descritos como os mais mutáveis, pois podem ser facilmente modificados.

Santos (2009) destaca que muitos modelos precisam ser calibrados para que reproduzam, o mais próximo possível, o fenômeno a ser modelado. Essa calibração é necessária porque as equações matemáticas utilizadas em cada modelo hidrológico utilizam uma série de parâmetros, os quais representam as características e os processos físicos da bacia. Para Martins e Paiva (2003) a precipitação, a vazão e a evaporação são processos essenciais à compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Os dados desses processos servem de base às etapas de calibração e validação de modelos hidrológicos e, portanto, às hipóteses científicas atreladas nesses modelos.

A modelagem hidrológica é limitada pela variação das características físicas da bacia, e por isso o modelo pode levar em consideração simplificações dos fenômenos envolvidos nos processos. Essa limitação favoreceu o desenvolvimento de diversos modelos que se diferenciam através dos dados utilizados, da discretização, das propriedades que representam os processos e dos objetivos almejados (TUCCI, 2005; MORIASI et al., 2012).

2.3.1 Classificação dos Modelos

Os modelos podem ser classificados em: lineares; contínuos ou discretos; concentrados ou distribuídos; estocásticos ou determinísticos; conceituais ou empíricos (TUCCI, 2005). O modelo linear apresenta como características o princípio da superposição e a propriedade de homogeneidade. O princípio de superposição caracteriza-se quando, por exemplo, uma entrada y_1 resulta na saída x_1 do sistema, bem como uma entrada y_2 produz a saída x_2 , ou seja, a superposição é válida quando as entradas y_1+y_2 resultam na x_1+x_2 desse mesmo sistema. Já a propriedade da homogeneidade ocorre quando o número de entradas no sistema é igual ao número de saídas.

Modelos contínuos são caracterizados por fenômenos sucessivos no tempo, enquanto que nos modelos discretos as mudanças ocorrem em intervalos de tempo discretos. A escolha do intervalo de tempo depende do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada dos resultados. O modelo é dito concentrado quando o sistema não considera a variabilidade espacial, diferentemente do modelo distribuído que leva em consideração a variabilidade espacial e temporal das variáveis do modelo. Na modelagem concentrada do processo chuva-vazão de uma bacia hidrográfica, todas as variáveis do sistema são avaliadas em termos da média espacial, ou seja, a chuva, as vazões e outras variáveis são consideradas em termos médios na bacia (FAYAL, 2008).

Modelos estocásticos são aqueles que levam em consideração os conceitos de probabilidade na elaboração do modelo, e as variáveis envolvidas no processo tem comportamento aleatório. Já os modelos determinísticos não seguem os conceitos de probabilidade, sendo que cada valor de entrada produz um valor de saída. Nesses modelos, utilizando dados de entrada, como por exemplo, volumes precipitado e evaporado, condições iniciais de umidade do solo e cobertura vegetal, é possível obter séries de vazões (ALMEIDA; SERRA, 2017).

O modelo é classificado como conceitual quando as funções utilizadas na formulação do sistema baseiam-se nos processos físicos que envolvem o fenômeno estudado. Os modelos empíricos ou “caixa preta” são aqueles baseados em observações, onde os valores calculados se ajustam, através de funções, aos dados observados.

2.3.2 Modelo Linear Simples (MLS)

Os modelos hidrológicos chuva-vazão podem apresentar uma relação linear ou não linear. O modelo linear simples (MLS) foi apresentado por Sherman (1932), que introduziu o conceito de hidrograma unitário. O MLS vem sendo usado ao longo dos anos por diversos pesquisadores, como por exemplo, Udomboso and Amahia (2011) que fizeram uma análise comparativa entre o MLS e as Redes Neurais Artificiais (RNA) na modelagem das chuvas de uma cidade da Nigéria; Blanco et al. (2013) aplicaram três modelos hidrológicos, entre eles o MLS, em duas pequenas bacias da Amazônia para simular as curvas de permanência; já Bartoletti et al. (2017) combinaram a Análise de Componentes Principais e o Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptado para estimar a vazão de saída a partir de dados de chuva e vazão em duas bacias da Itália. Os modelos lineares também são comumente utilizados em outras áreas de pesquisas. Keramatlou et al. (2015) utilizaram um modelo linear para estimar a área da folha da noqueira Persa; Kiplangat et al. (2016) estimaram a velocidade do vento utilizando um modelo linear

auto regressivo; enquanto Dbouk e Jamali (2018) avaliaram a precisão de modelos lineares e não-lineares para estimar os preços diários do petróleo.

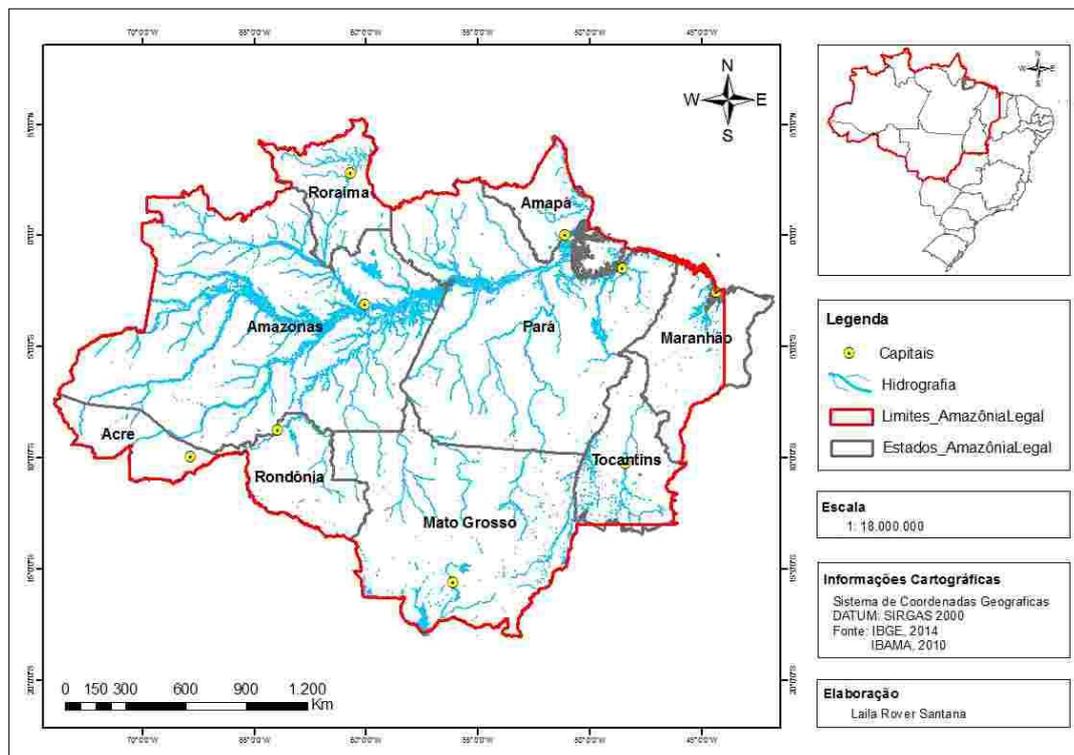
Os modelos hidrológicos chuva-vazão dependem das características fisiográficas, climáticas e bióticas da bacia, e esses fatores podem causar um comportamento linear, não-linear ou até mesmo complexo entre as variáveis chuva e vazão (CHANDWANI et al., 2015). A não linearidade dos modelos chuva-vazão ocorre, principalmente, pela infiltração e evaporação, bem como pelas variações espaciais do subsolo das bacias hidrográficas. A variabilidade no tempo também é uma característica desses modelos, sendo explicada pela sazonalidade das chuvas e vazões dos sistemas hidrológicos (BLANCO et al., 2007).

Em pequenas bacias hidrográficas o uso de um modelo linear e invariável no tempo pode ser explicado pelas suas dimensões. Segundo Blanco et al. (2013), as hipóteses de um modelo linear chuva-vazão sugerem que toda chuva que cai em uma bacia é, aproximadamente, igual ao volume total escoado.

3. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado nas bacias hidrográficas da Amazônia Legal, área que corresponde a aproximadamente 59% do território brasileiro, abrangendo os Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, Mato Grosso e parte do Estado do Maranhão (a oeste do meridiano 44°), totalizando uma área superior a 5 milhões de km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2015) (Figura 4).

Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo: Amazônia Legal



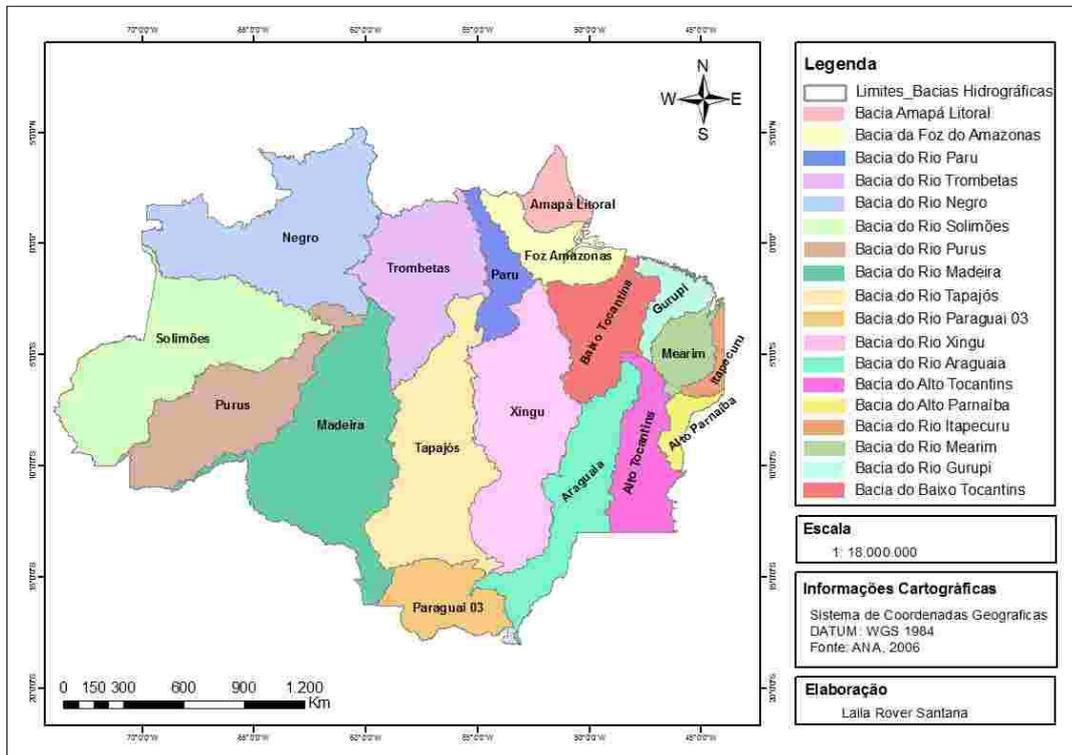
Instituída pela Lei nº 1.806 em 1953, a Amazônia Legal foi criada inicialmente como área de atuação da Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA), hoje extinta. Essa lei também anexava ao território os Estados do Maranhão, Goiás e Mato Grosso (IBGE, 2015). A Amazônia Legal possui uma população de mais 24 milhões habitantes, totalizando pouco mais de 12% da população brasileira, distribuídos em 772 municípios (IBGE, 2010; SANTOS, 2013).

3.1 HIDROGRAFIA

A hidrografia que compõe a Amazônia Legal possui um extenso e denso conjunto de rios e cursos d'água, que variam em extensão e volume. Pessoa (2015) descreve o regime fluvial dos rios amazônicos como uma interminável sequência de estiagem - enchente - cheia - vazante,

com uma expressiva amplitude entre suas vazões máximas e mínimas, a qual é determinada pela climatologia característica da região, que possui grandes volumes de chuvas. A rede de rios que compõe essa região abrange o maior rio do mundo, o Amazonas, que nasce nas Cordilheiras dos Andes, no Peru, e deságua no oceano Atlântico, na costa brasileira, possuindo uma extensão total de 6.400 km, dos quais cerca de 3.220 km estão dentro do Brasil. Incluindo as descargas de seus tributários, o rio Amazonas possui uma descarga média total estimada de 209.000 m³/s (MOLINIER et al., 1995). A Amazônia Legal abriga as maiores bacias hidrográficas contíguas, como as dos rios Xingu, Tapajós, Madeira, Purus, Javari, Solimões, Negro, Trombetas e Paru, todos afluentes do rio Amazonas, além das bacias dos rios Tocantins e Araguaia (Figura 5).

Figura 5 – Bacias hidrográficas da Amazônia Legal



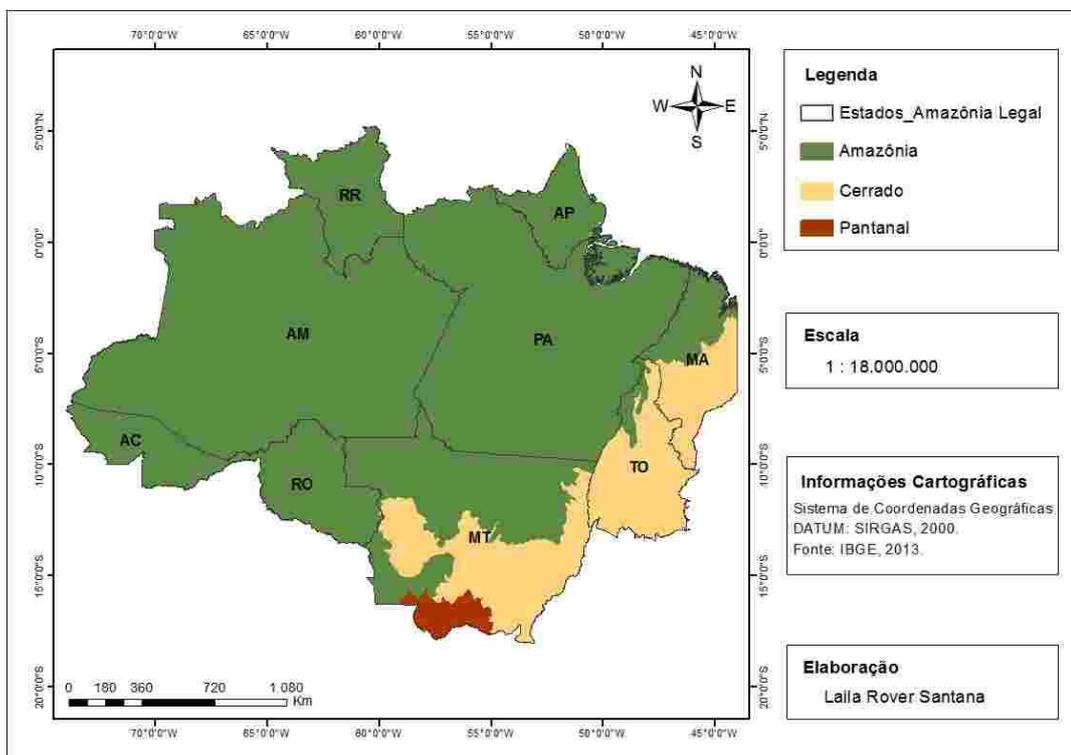
Os rios da Amazônia deságuam no oceano Atlântico (exorréicos) e distribuem-se entre rios de planície e planalto. De acordo com a coloração de suas águas, que é determinada pela presença de nutrientes e substâncias, os rios dessa região dividem-se em três tipos: rios de água preta, rios de água branca e rios de água clara. Os rios de água preta (ex.: rio Negro) caracterizam-se pela elevada quantidade de ácidos húmicos e fúlvicos em suspensão, resultante da decomposição do húmus no solo. Já os rios de água branca, apresentam um elevado teor de argila em suspensão, dando uma coloração amarelada e barrenta às suas águas, como é o caso

dos rios Amazonas, Madeira e Branco. Os rios de água clara, como o Tapajós e o Xingu, caracterizam-se pela presença de uma quantidade bem pequena de partículas em suspensão, o que possibilita uma visibilidade de até 4 metros nesses rios.

3.2 VEGETAÇÃO

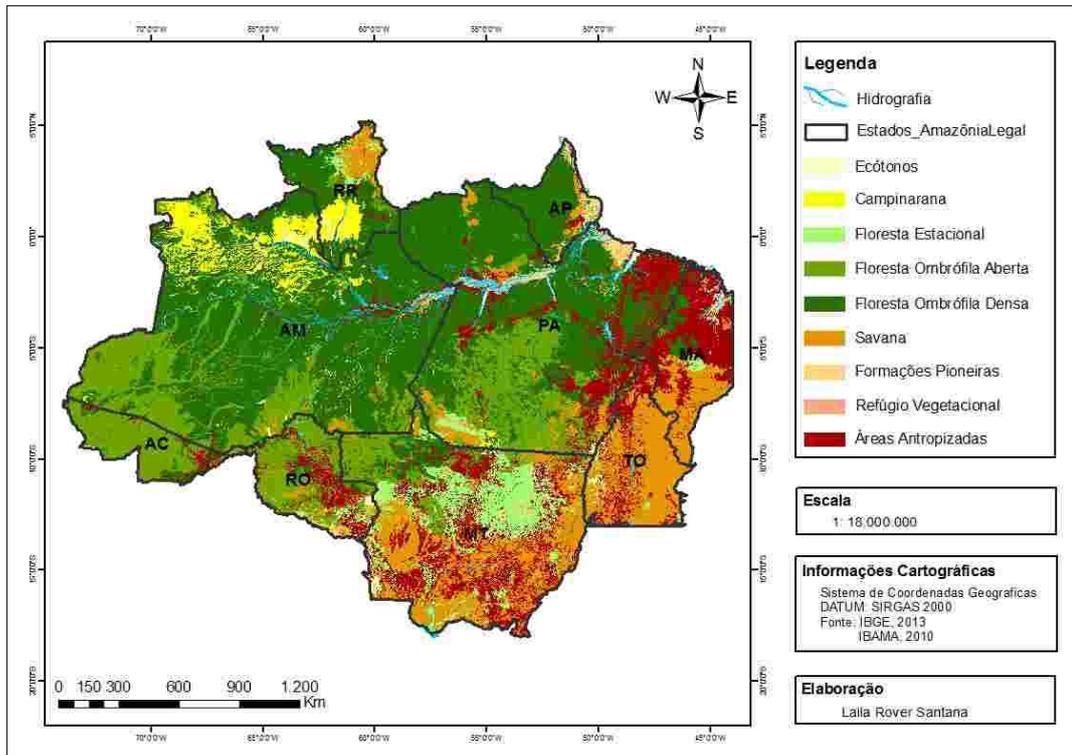
A Amazônia abriga uma ampla quantidade de espécies animais e vegetais, sendo que muitas só ocorrem nesta região. A Amazônia Legal abrange toda área do bioma Amazônia, e apresenta também os biomas Cerrado e Pantanal, este último presente apenas no estado do Mato Grosso (Figura 6).

Figura 6 – Mapa dos biomas da Amazônia Legal



Essa região é composta em grande parte de florestas tropicais, incluindo ainda outros tipos de vegetações. A floresta ombrófila densa, chamada de “coração da Amazônia”, é a vegetação predominante, totalizando aproximadamente 42%. As porções sul da Amazônia Legal e o nordeste de Roraima são cobertos, em sua grande maioria, por vegetação savânica. Entre essa faixa de vegetação savânica ao sul e o chamado “coração da Amazônia” estende-se uma longa faixa de floresta ombrófila aberta, representando a transição entre os biomas Cerrado e Amazônia (JÚNIOR; CONTINI; NAVARRO, 2011) (Figuras 7).

Figura 7 - Mapa da cobertura vegetal da Amazônia Legal.



A área desmatada na Amazônia Legal é de 15% da área total, e esse processo de desmatamento aumentou nas últimas quatro décadas, concentrando-se nas bordas sul e leste da região, conhecida como “arco do desmatamento” (Figura 7). A antropização tem ocorrido, sobretudo, pela substituição da cobertura natural por pastos para pecuária extensiva (SANTOS, 2013).

3.3 CLIMA

Segundo a classificação de Köppen, o trópico úmido brasileiro está submetido ao grupo de clima chuvoso A, caracterizado pela ausência de estação fria e temperaturas médias acima de 18°C. Para a região da Amazônia Legal, essa categoria engloba três tipos climáticos: Af, com ausência de período seco e registro de chuvas acima de 60 mm em todos os meses do ano; Am, caracterizada pelo elevado índice pluviométrico anual e por apresentar pequeno período seco; e Aw, com chuvas de verão. A estação seca bem definida abrange 52% da área, enquanto que apenas 20% da Amazônia Legal apresenta clima tropical chuvoso sem estação seca definida, e o restante da área (28%) tem clima tropical chuvoso com período seco de até 90 dias (BASTOS, 1982; JÚNIOR et al., 2011).

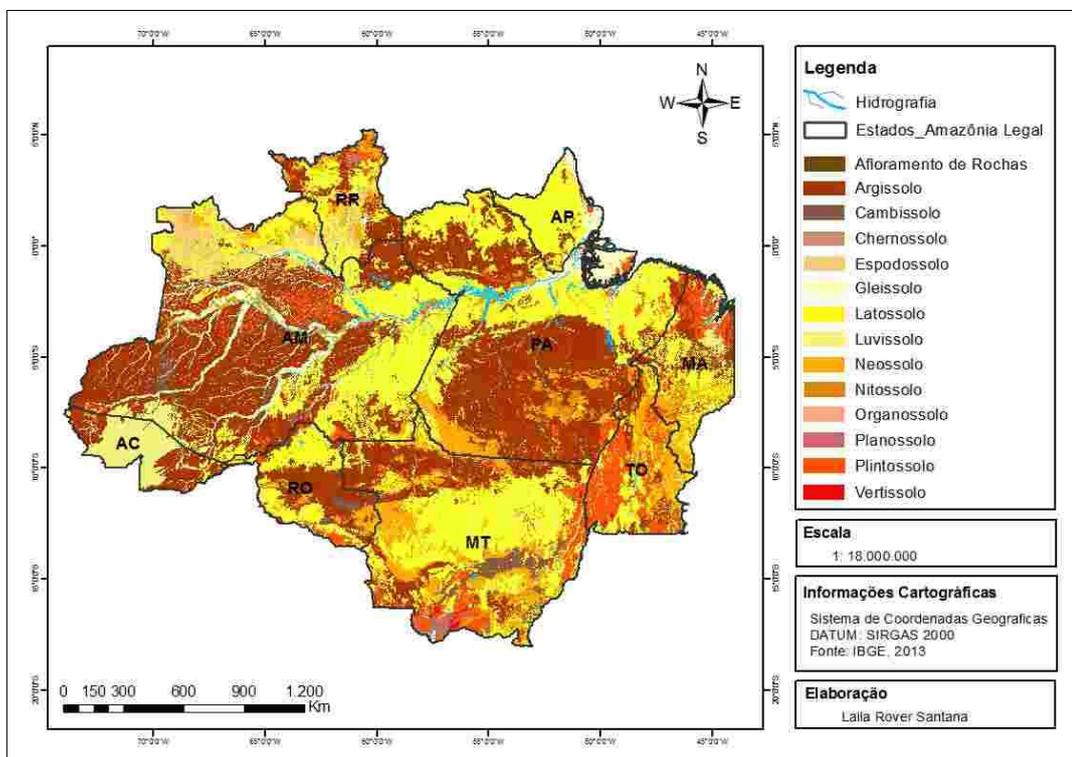
Presume-se que grande parte do volume de chuvas que cai no continente ocorre na região Amazônica, uma vez que, além de possuir uma grande extensão territorial, essa área apresenta

uma das mais altas taxas de precipitação da Terra, de aproximadamente 2.300 mm ao ano. As chuvas, principalmente nas áreas abrangidas pelos climas Am e Aw, distribuem-se em duas épocas distintas. O período chuvoso tem início em novembro/dezembro, estendendo-se até maio/junho, enquanto o período de menor precipitação ocorre durante os demais meses do ano. Os meses de Abril e Outubro são meses de transição entre um regime e outro (JÚNIOR et al., 2011).

3.4 SOLO E RELEVO

Considerado um dos principais elementos da biosfera, o solo possui múltiplas funções ambientais, como servir de substrato à produção agropecuária e regular fluxos de água, gases e energia. Na Amazônia Legal, predominam duas classes de solo: os latossolos e os argissolos (Figura 8).

Figura 8 – Mapa de solos da Amazônia Legal.

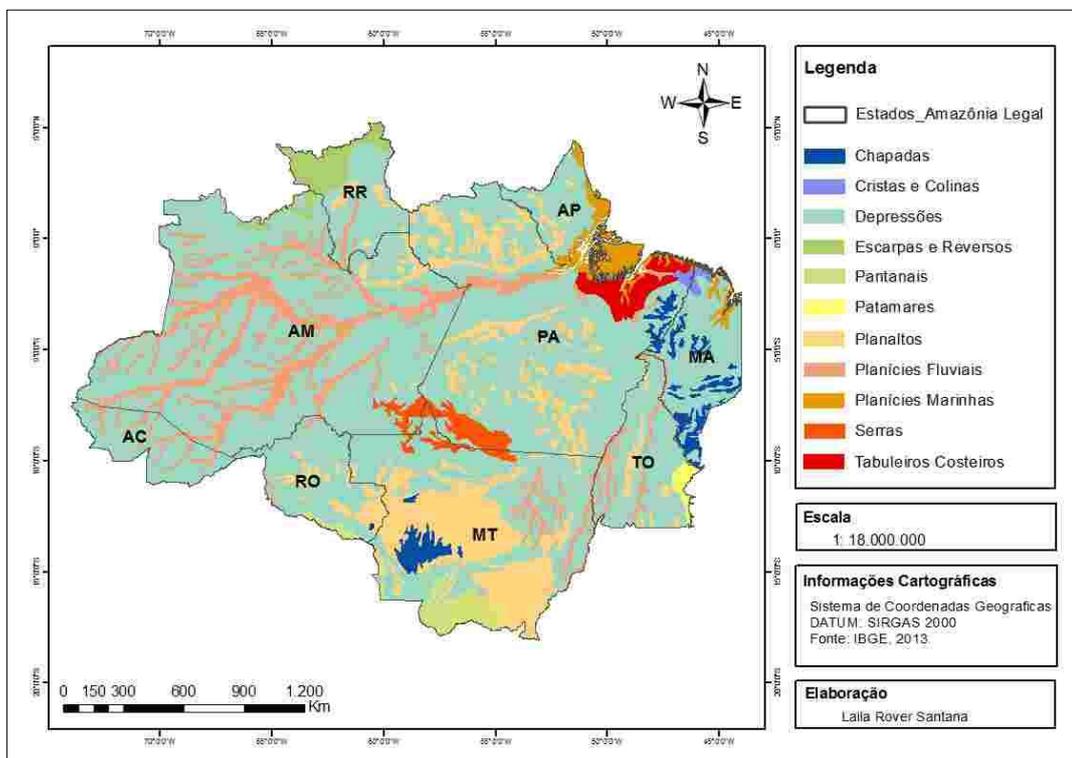


Os latossolos caracterizam-se por serem bem drenados, profundos, porosos e permeáveis. Sua coloração varia do amarelo ao vermelho escuro, distinguindo-se conforme o teor de óxido de ferro presente no solo. São encontrados em áreas com topografia suave e relevo mais acidentado, sendo formados em ambientes com intensa umidade e calor. São geralmente acidificados, sendo considerados os solos onde os materiais são os mais decompostos. Já os argissolos possuem profundidade mediana, são moderadamente drenados, com coloração

variando do vermelho ao amarelo. Apresentam baixos teores de matéria orgânica, ocorrem em áreas de relevo acidentado e possuem textura argilosa, o que acaba facilitando a erosão, uma vez que a argila e o tipo de relevo dificultam a penetração de água no perfil do solo (SILVA et al., 2005; BRANDÃO et al., 2010).

A dimensão territorial da Amazônia justifica a complexidade estrutural e morfológica do relevo dessa região, que é formado sobre terrenos de diferentes idades geológicas e está sujeito a uma dinâmica marcada por mecanismos morfogenéticos característicos das zonas climáticas tropicais úmidas. Na Amazônia Legal, predominam os relevos colinosos e com densa cobertura vegetal, os quais são característicos de áreas onde os rios são os principais agentes de esculturação do relevo. Outras formas de relevo encontradas na região são as planícies e os pantanais mato-grossenses, que ocorrem mais expressivamente nos Estados do Amazonas (Planície Amazônica), Pará e Mato Grosso (IBGE, 2011) (Figura 9).

Figura 9 – Mapa de distribuição do relevo na Amazônia Legal



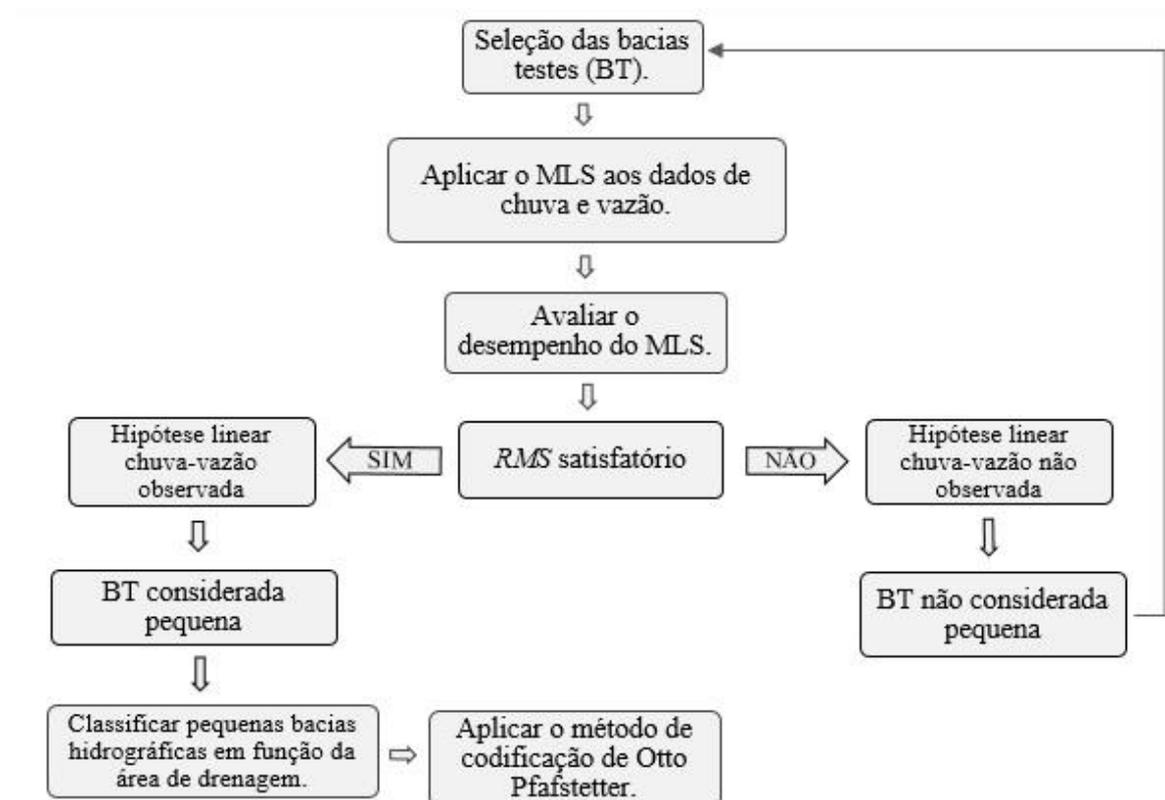
As planícies originam-se da deposição de sedimentos, principalmente pela ação dos rios, e por isso são encontradas, sobretudo, ao longo da rede fluvial (IBGE, 2011). Ocorrem principalmente no Estado do Amazonas, Mato Grosso e Pará. Planaltos e chapadas são unidades de relevo que ocorrem de forma significativa na região, sendo encontrados mais expressivamente nos Estados do Mato Grosso, Pará e Maranhão.

Ressalta-se que os mapas apresentados para descrever a área de estudo, bem como o mapa de localização das estações pluviométricas e fluviométricas (Figura 11), foram elaborados a partir de metadados, em formato *shapefile*, disponibilizados nos bancos de dados da ANA, do IBGE e do IBAMA.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do trabalho foi realizada em cinco etapas (Figura 10). A primeira etapa consistiu na seleção das bacias testes (BT), que foram definidas conforme as áreas de drenagem e a disponibilidade de dados pluviométricos e fluviométricos. Na segunda etapa o MLS proposto por Blanco et al. (2005) foi aplicado aos dados de chuva e vazão das BT selecionadas, buscando verificar a linearidade entre essas variáveis. As hipóteses de linearidade e invariabilidade no tempo do MLS permitem estabelecer uma relação linear de causa e efeito entre os dados de chuva e vazão. Relação essa observada em bacias com pequenas dimensões. A terceira fase foi avaliar o desempenho do modelo através da raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMS - Root Mean Square Error*), calculado entre as vazões de permanência observadas e simuladas da etapa de validação do modelo. Analisando os resultados do *RMS* juntamente com os hidrogramas diários e as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas geradas na validação do MLS, a quarta etapa foi a definição de pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem. A quinta e última etapa foi aplicar o método de codificação de Otto Pfafstetter na área de estudo e identificar em que nível foram encontradas apenas pequenas bacias hidrográficas.

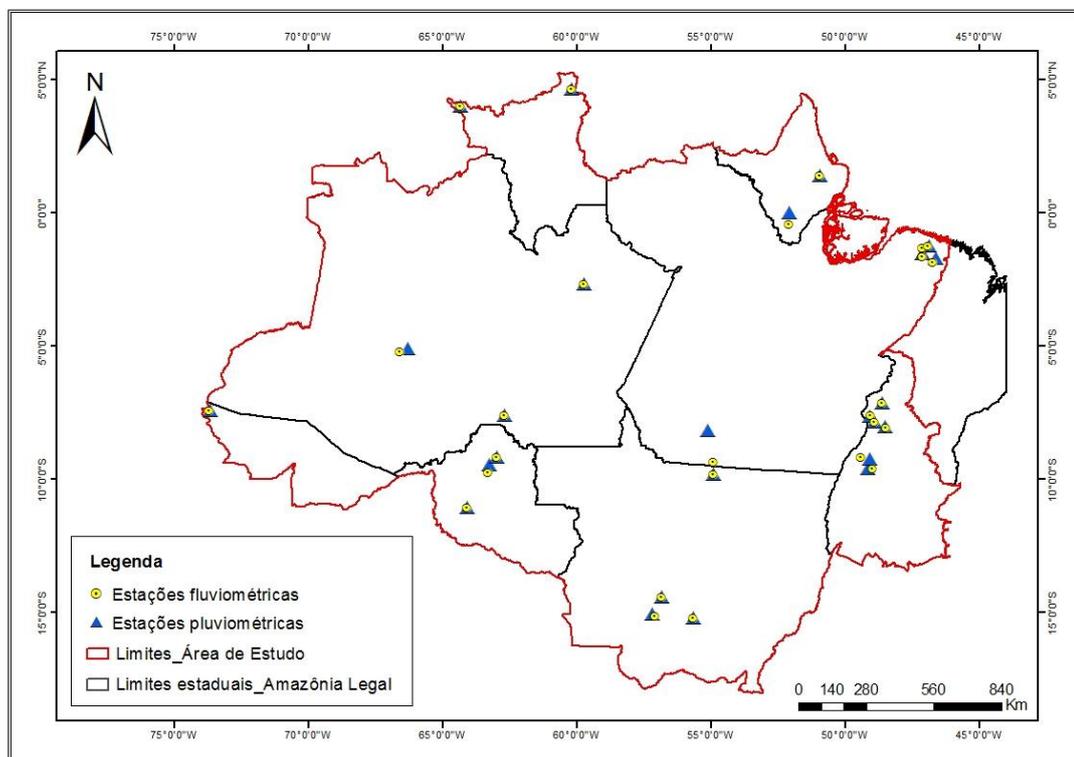
Figura 10 – Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.



4.1 BACIAS TESTES

O Sistema de Informações Hidrológicas – HIDROWEB da ANA foi utilizado para selecionar as bacias testes e suas respectivas estações meteorológicas. Ao todo foram selecionadas para o estudo 26 bacias testes (BT) (Apêndice I). Cada bacia teste selecionada possui um posto de monitoramento fluviométrico, porém nem todas possuíam um posto de monitoramento pluviométrico. Nos casos sem dados diretos de chuva, foram selecionadas as estações pluviométricas mais próximas possíveis das estações fluviométricas. O MLS foi aplicado a dados diários de 26 estações pluviométricas e 26 fluviométricas (Figura 11). Vale ressaltar que nesta primeira etapa do estudo, a aplicação do MLS, o estado do Maranhão não foi incluído, pois a climatologia desse estado começa a se diferenciar da climatologia dos outros estados da Amazônia Legal.

Figura 11 – Mapa de localização das estações pluviométricas e fluviométricas na área de estudo.



As 26 bacias hidrográficas selecionadas possuem áreas de drenagem variando de 32,7 a 1.810 km² (Apêndice I). Este intervalo foi definido a partir de valores encontrados na literatura para pequenas bacias (TUCCI; CLARKE, 2003; TUCCI, 2004), e também para demonstrar que com o aumento da área da bacia o desempenho do modelo tende a diminuir. Os valores de área de drenagem foram obtidos do HIDROWEB da ANA, que considera a estação fluviométrica

como sendo o exutório da bacia. Vale ressaltar que as bacias testes são rurais e não sofrem influência de maré. Outro critério de seleção das bacias testes foi a disponibilidade de séries históricas de chuva e vazão. Recomenda-se utilizar as mais longas séries possíveis, porém muitas estações hidrológicas não dispõem de longos períodos de dados. Por esse motivo, foram utilizados os maiores períodos de dados de chuva e vazão disponíveis nos postos de monitoramento das bacias testes.

4.2 MODELO LINEAR SIMPLES – MLS

Neste estudo foi utilizado o MLS descrito por Blanco et al. (2005), modelo hidrológico que estabelece uma relação linear de causa e efeito entre os dados de chuva e vazão para pequenas bacias hidrográficas. As hipóteses do modelo são a linearidade e a invariabilidade no tempo, onde as vazões $y(t)$ são representadas pelo produto da convolução entre a chuva $x(t)$ que precipita sobre a bacia hidrográfica; e a função da resposta impulsional $h(u)$ (Equação 1).

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u)x(t - u)du \quad (1)$$

4.2.1 Determinação da Resposta Impulsional

De posse dos dados de chuva e vazão, determina-se a resposta impulsional do sistema, que é baseada na análise espectral cruzada (Rodriguez, 1967) aplicada às séries hidrológicas. Deve-se acrescentar às hipóteses do sistema, representado pela Equação (1), a hipótese de que os sistemas hidrológicos são reais, ou seja, $h(u) = 0$, se $u < 0$. Assim, a Equação (1) torna-se:

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(u)x(t - u)du \quad (2)$$

A entrada $x(t)$ e a saída $y(t)$ são consideradas como dois processos aleatórios e estacionários. Multiplicando a Equação (2) por $x(t - \tau)$ e considerando a esperança matemática (Equação 3), tem-se.

$$E[y(t)x(t - \tau)] = \int_0^{\infty} h(u)E[x(t - u)x(t - \tau)]du \quad (3)$$

obtendo-se a Equação (4).

$$\gamma_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} h(u)\gamma_x(\tau - u)du \quad (4)$$

onde γ_{xy} é a covariância cruzada entre $x(t)$ e $y(t)$; γ_x é a autocovariância de $x(t)$ e τ é a decalagem.

A Equação (4) é a integral de Wiener-Hopf (CHATFIELD, 1980) e a partir dela determinam-se as respostas impulsionais $h(u)$ no domínio do tempo. Para facilitar, a Equação (4) é considerada no domínio da frequência e sua forma discreta é descrita pela Equação (5).

$$\gamma_{xy}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k \gamma_x(\tau - k) \quad (5)$$

Aplicando-se a transformada de Fourier à Equação (5), pela multiplicação por $\frac{e^{-i\omega k}}{\pi}$ e soma por τ de $-\infty$ a ∞ , obtêm-se a equação (6):

$$f_{xy}(\omega) = \frac{\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} h_k e^{-i\omega k} \gamma_x(\tau - k) e^{-i\omega(\tau - k)}}{\pi}$$

$$f_{xy}(\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k e^{-i\omega k} f_x(\omega)$$

$$f_{xy}(\omega) = H(\omega) f_x(\omega)$$

$$H(\omega) = \frac{f_{xy}(\omega)}{f_x(\omega)} \quad (6)$$

onde f_{xy} é o espectro de variância cruzada entre a entrada e saída; f_x é o espectro de variância da entrada e $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência.

Os espectros f_x e f_{xy} podem ser estimados a partir de um truncamento m aplicado às transformadas de Fourier de γ_x e γ_{xy} , representadas, respectivamente, por C_x (Equação 7) e por C_{xy} e C_{yx} (Equações 8 e 9):

$$C_x(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{n} \quad (7)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{n} \quad (8)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x})}{n} \quad (9)$$

em que C_x é a autocovariância discreta de $x(t)$; C_{xy} é a covariância discreta cruzada entre $x(t)$ e $y(t)$; C_{yx} é a covariância discreta cruzada entre $y(t)$ e $x(t)$; k varia de zero (0) a m e representa o intervalo de tempo entre os dados x e y ; e i é o passo no domínio do tempo.

Para garantir que os valores estimados não sejam tendenciosos, utiliza-se uma função de ponderação D_k , também conhecida como filtro de Tukey. Os espectros estimados tornam-se:

$$f_x(\omega) = \frac{1}{\pi} [D_0 C_x(0) + 2 \sum_{k=1}^m D_k C_x(k) \cos \omega k] \quad (10)$$

$$f_{xy}(\omega) = c(\omega) - iq(\omega) \quad (11)$$

onde:

$$c(\omega) = \frac{1}{\pi} \{D_0 C_x(0) + \sum_{k=1}^m D_k [C_{xy}(k) + C_{yx}(k)] \cos \omega k\} \quad (12)$$

$$q(\omega) = \frac{1}{\pi} \{ \sum_{k=1}^m D_k [C_{xy}(k) - C_{yx}(k)] \sin \omega k \} \quad (13)$$

As equações (10) e (11) representam, respectivamente, as transformadas de Fourier das funções de γ_x e γ_{xy} , onde:

$$D_k = \frac{[1 + \cos(\frac{\pi k}{m})]}{2} \quad (14)$$

Após determinar as respostas impulsãoais no domínio da frequência, aplica-se a transformada inversa de Fourier discreta para que essas respostas sejam representadas no domínio do tempo. Dessa maneira é possível aplicar a convolução aos dados de entrada e às respostas impulsãoais, reconstituindo os dados de saída.

4.2.2 Transformada Inversa de Fourier Discreta

Como o modelo utilizado neste estudo considera que os sistemas hidrológicos são reais, a equação da transformada inversa de Fourier discreta, definida a partir de $k = 0$, é dada por:

$$H(i) = \int_{k=0}^{m/2} Re \bar{H}(k) \cos(2\pi ki/m) + \int_{k=0}^{m/2} Im \bar{H}(k) \sin(2\pi ki/m) \quad (15)$$

em que $H(i)$ é a resposta impulsional calculada no domínio do tempo; $i = 0, 1, 2, \dots, m$; $Re\bar{H}(k)$ e $Im\bar{H}(k)$ são as partes real e imaginária, respectivamente, normalizadas da resposta impulsional; e $k = 0, 1, 2, \dots, m/2$. A normalização de $Re\bar{H}(k)$ e $Im\bar{H}(k)$ é descrita nas Equações (16) e (17):

$$Re\bar{H}(k) = \frac{ReH(k)}{m/2} \quad (16)$$

$$Im\bar{H}(k) = \frac{ImH(k)}{m/2}, \quad k = 1, 2, \dots, (m/2) - 1 \quad (17)$$

exceto nos casos limites,

$$Re\bar{H}(0) = \frac{ReH(0)}{m}$$

$$Re\bar{H}(m/2) = \frac{ReH(m/2)}{m}$$

Essa normalização é realizada para evitar problemas numéricos durante a execução dos programas que calculam a Transformada Inversa de Fourier.

4.2.3 Convolução Discreta para Sistemas com Memória Finita

Com a determinação da resposta impulsional no domínio temporal, aplica-se a convolução aos dados de entrada $x(t)$ e à resposta impulsional do sistema $h(t)$, resultando nos dados de saída $y(t)$. Neste estudo, os dados de entrada são representados pela precipitação P (mm) e os de saída pela vazão Q (m³/s). Segundo Blanco et al. (2005), o caminho percorrido pelas chuvas em uma bacia hidrográfica até o rio é muito complexo, pois depende das condições de evaporação, interceptação, umidade do solo e dos escoamentos subterrâneos, os quais dependem dos eventos passados de chuva. Essas condições controlam o armazenamento e o escoamento superficial das bacias hidrográficas. A dependência do estado das bacias em relação aos eventos passados de chuva é traduzida pela memória dos sistemas hidrológicos, que são representados pela forma discreta da integral da convolução, dada pela Equação (18).

$$Q_i = \sum_{j=i}^m h_j P_{i-j+1} \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n+m-1 \quad (18)$$

onde m é o comprimento da memória do sistema, que representa o efeito de uma chuva contínua que se estende por m intervalos de duração T , onde T depende da frequência com que os dados são obtidos (diários, horários, etc.); e n é o número de observações. Para este modelo, o m também define o ponto de truncamento utilizado no cálculo das respostas impulsiais.

Conforme descrito por Blanco et al. (2005), o algoritmo aplicado ao MLS pode ser resumido nas seguintes etapas (Figura 12).

Figura 12 - Algoritmo aplicado do MLS desenvolvido por Blanco et al. (2005).



Fonte: Adaptado de Blanco et al. (2005).

4.2.4 Critérios de Desempenho

Para avaliar o desempenho do modelo e otimizar o valor de m (truncamento), aplicou-se a raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMS - Root Mean Square Error*), que é calculada entre as vazões observadas e simuladas em um determinado período de tempo (Equação 19).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad (19)$$

em que Q_{Oi} e Q_{Si} são as vazões observadas e simuladas, respectivamente, no tempo i ; e n é o número total de observações.

Como o presente estudo busca identificar as pequenas bacias hidrográficas através da hipótese de linearidade entre os dados de chuva e vazão, o *RMS* também foi utilizado como critério de desempenho para avaliar a simulação das curvas de permanência da etapa de validação do MLS. Ele foi calculado entre as vazões de permanência observadas e simuladas (Equações 20).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O\%} - Q_{S\%})^2}{n}} \quad (20)$$

onde $Q_{O\%}$ e $Q_{S\%}$ são, respectivamente, as vazões de permanência observadas e simuladas no tempo i ; e n é o número total de observações.

A definição das pequenas bacias em função da área de drenagem foi realizada, observando os resultados de *RMS* obtidos entre as vazões observadas e simuladas da validação do modelo de cada BT. Quanto menor o valor de *RMS* melhor será o ajuste entre os dados simulados e observados. Valores iguais ou próximos de 0 (zero) indicam um ajuste perfeito, entretanto, valores de *RMS* menores que o desvio padrão dos dados observados podem ser considerados baixos, indicando uma boa simulação do modelo (SINGH et al., 2004).

4.2.5 Calibração e Validação do Modelo

A calibração do modelo é o processo de otimização do comprimento da resposta impulsional m , tendo-se como função objetivo o *RMS*. O parâmetro m depende da decalagem k (intervalo de tempo entre os dados de chuva e vazão), e ambos são necessários para calcular a resposta impulsional do sistema. Então o MLS é aplicado aos dados de chuva e vazão das bacias para um determinado período de tempo. Os valores de *RMS* são determinados em função de m para certo valor de k , assim o procedimento é repetido até que o *RMS* seja minimizado pelo método das iterações sucessivas. A etapa seguinte é a validação, processo no qual a convolução discreta é aplicada aos dados de chuva e à resposta impulsional com os valores de m e k encontrados na calibração do modelo.

Para realizar a calibração e a validação do modelo com os dados de chuva e vazão das bacias testes, adotou-se a seguinte metodologia: nas bacias com períodos pares de séries históricas a calibração foi aplicada à primeira metade dos anos e a validação à segunda metade, já nas bacias com períodos ímpares a calibração foi aplicada a metade do período mais um e a validação aos anos restantes.

Segundo estudos realizados por Blanco et al. (2005), Quintas et al. (2011), Vinagre et al. (2011) e Blanco et al. (2013), um ano e meio de dados é o tempo mínimo para que o modelo seja aplicado em pequenas bacias hidrográficas. Nesse contexto, foram selecionadas bacias com, no mínimo, 2 anos e 6 meses de dados de chuva e vazão, a fim de não comprometer o desempenho do modelo.

4.3 SISTEMA DE OTTOCODIFICAÇÃO

O sistema proposto por Otto Pfafstetter baseia-se na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem, por isso o uso de Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes (MDEHC) tornam-se indispensáveis na ottocodificação, pois permitem a delimitação das ottobacias com maior precisão, uma vez que levam em consideração os dados altimétricos do terreno.

4.3.1 Obtenção do MDEHC

Para obtenção do MDEHC, primeiramente, foram utilizados os dados do MDE extraídos das imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizadas no site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). As imagens estão no sistema de coordenadas geográficas e Datum WGS – 1984 com resolução 90 x 90 m. De acordo com Miranda (2005), essas imagens equivalem às cartas do IBGE na escala de 1:250.000. As cartas selecionadas foram as que compõem os Estados da Amazônia Legal. Para esta etapa do estudo, o estado do Maranhão foi incluído. Para o tratamento das imagens SRTM e obtenção do MDEHC, foi utilizado um software ArcGIS® 10.2 do ESRI. O conjunto de extensões utilizado para o tratamento dos dados foi o do ambiente *Spatial Analyst Tools do ArcToolbox*®.

A primeira etapa na geração do MDEHC consiste no preenchimento de depressões espúrias, que segundo ELESBON et al. (2011), “são altitudes equivocadas devido ao processo de interpolação ou obtenção da imagem por satélite”. A função *FILL* foi utilizada para corrigir essas falhas. A etapa seguinte foi determinar a direção do fluxo de água na rede de drenagem, sendo obtida através da função *FLOW DIRECTION*. Esta função gera uma grade regular definindo as direções de fluxo, tendo como base a linha de maior declividade do terreno (SOBRINHO, 2010).

A partir da direção do fluxo, é gerado o fluxo acumulado do MDE através da função *FLOW ACCUMULATION*. Em seguida foi aplicada a função *CON* para definir a quantidade de feições de drenagens geradas (SOBRINHO, 2010). Neste estudo, a codificação foi realizada a partir de uma drenagem numérica gerada pela acumulação de 50 células do MDEHC. Ressalta-

se que esse valor foi utilizado a partir de comparações realizadas com a base hidrográfica ottocodificada da ANA, buscando-se aproximar, ao máximo, a drenagem gerada a partir do MDEHC com a drenagem da ANA.

4.3.2 Ottocodificação

De posse do MDEHC da área de estudo, a metodologia de Otto Pfafstetter foi aplicada em todas as bacias hidrográficas da área de estudo, partindo-se da ottocodificação nível 2 fornecida pelo banco de dados da ANA. Inicialmente, foi identificado o rio principal da bacia a ser codificada. Em seguida, foram separadas as quatro maiores bacias ao longo do rio principal, as quais receberam como código, em ordem de jusante para montante, os números pares 2, 4, 6 e 8. As bacias restantes, chamadas de interbacias, receberam como códigos os números ímpares 1, 3, 5, 7 e 9, também atribuídos de jusante para montante. Este processo foi repetido até o nível em que foram identificadas apenas pequenas bacias hidrográficas, as quais foram definidas em função da área da drenagem na aplicação do MLS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos em dois tópicos. O primeiro aborda a discussão dos resultados da calibração e validação do MLS em cada bacia teste, bem como identifica se a área de drenagem da bacia influencia no desempenho do modelo. O desempenho é avaliado através da raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMS*) e a partir dos resultados obtidos classificaram-se as pequenas bacias em função da área de drenagem. No segundo tópico são apresentados os resultados da Ottocodificação aplicada à área de estudo, onde se identificou em que nível de ramificação são encontradas apenas pequenas bacias hidrográficas.

5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O MLS foi aplicado em 26 bacias testes (BT) localizadas na região da Amazônia Legal. A Tabela 1 apresenta as estações fluviométricas e pluviométricas de cada BT, bem como os períodos de calibração e validação utilizados no modelo. As áreas de drenagem de cada BT também estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados pluviométricos e fluviométricos das BT utilizados no MLS.

Bacia Teste	Nome	Área de Drenagem (km ²)	Estação Fluviométrica (código)	Estação Pluviométrica (código)	Período de Calibração	Período de Validação
BT1	Marambaia	32,7	31600000	00147016	1999-2002	2003-2006
BT2	Fazenda Craveiro	186	27370000	00949000	2004-2005	2006-2007
BT3	Arraial	290	32300000	00147000	1968-1969	1970-1971
BT4	Próximo Colinas de Tocantins	386	23130000	00848000	1995-1996	1997-1998
BT5	Base do Cachimbo	465	17345000	00855000	1995-1997	1998-1999
BT6	Missão Auaris-Jusante	621	14485010	08464001	1998-2002	2003-2007
BT7	UHE Manso Rio Quilombo	693	66174000	01555010	jul/2001-2005	2006-jun/2010
BT8	São Pedro	735	19200000	00052003	2009-2011	2012-2013
BT9	Maici-Mirim	735	15660000	00762002	2005-2007	2008-2009
BT10	Mineração Ponte Massangana	852	15432000	00963009	1999-2000	2001-2002
BT11	Rio Preto da Eva	976	15042000	00259004	2003-2007	2008-2011
BT12	Cachimbo	1010	17350000	00954001	2004-2007	2008-2010

BT13	Serra do Moa	1030	12400000	00773000	1997-1999	2000-2001
BT14	Seringal São Luiz	1050	15245000	01164000	1982-1983	1984-1985
BT15	Maloca Ailan	1090	14560000	08460000	jul/1977-1978	1979-jun/1980
BT16	Nova Mocajuba	1130	32350000	00146013	1966-1968	1969-1971
BT17	Arapoema	1150	27550000	00749000	2001-2003	2004-2005
BT18	Mineração Jacundá	1200	15590000	00962001	1992-1993	1994-1995
BT19	Jauquara	1310	66008000	01557001	1976-1978	1979-1980
BT20	Muricilândia	1580	28150000	00748003	1998-2001	2002-2004
BT21	Nortelândia	1600	66006000	01456003	1998-2002	2003-2006
BT22	Ponte Rio Piranhas	1660	27380000	00949001	1995-1998	1999-2002
BT23	Fazenda Boa Esperança	1720	12875000	00566000	1983-1984	1985-1986
BT24	Bernardo Sayão	1790	27530000	00748001	2004-2005	2006-2007
BT25	Sete Ilhas	1800	32400000	00146005	1998-2002	2003-2006
BT26	Tartarugal Grande	1810	30075000	08150001	1998-2000	2001-2003

A calibração do modelo foi aplicada aos primeiros anos de dados de chuva e vazão das bacias (Tabela 1). Os valores de *RMS* foram determinados em função de *m* e *k*. Para a definição dos valores ótimos da resposta impulsional do sistema, os resultados da calibração foram plotados em gráficos e a partir das curvas obtidas foi possível identificar o valor mínimo de *RMS* (Apêndice II). Em cada calibração foram determinados os valores de *RMS*, *m* e *k* (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros de calibração para cada BT.

Bacia Teste	RMS (m ³ /s)	<i>k</i> (dias)	<i>m</i> (dias)
BT1	0,39	2	257
BT2	4,28	3	99
BT3	1,32	3	261
BT4	5,72	2	365
BT5	10,59	2	245
BT6	9,79	3	161
BT7	5,18	3	348
BT8	13,56	3	341
BT9	19,07	3	189
BT10	16,52	3	103
BT11	6,84	3	355
BT12	19,93	3	365
BT13	22,79	2	252
BT14	12,43	3	100
BT15	19,65	3	41
BT16	17,67	4	365
BT17	12,28	3	101
BT18	14,25	3	237
BT19	23,06	2	124
BT20	14,37	2	364
BT21	20,85	3	129
BT22	12,84	2	365
BT23	73,47	4	127
BT24	14,51	3	170
BT25	39,16	3	240
BT26	43,70	2	283

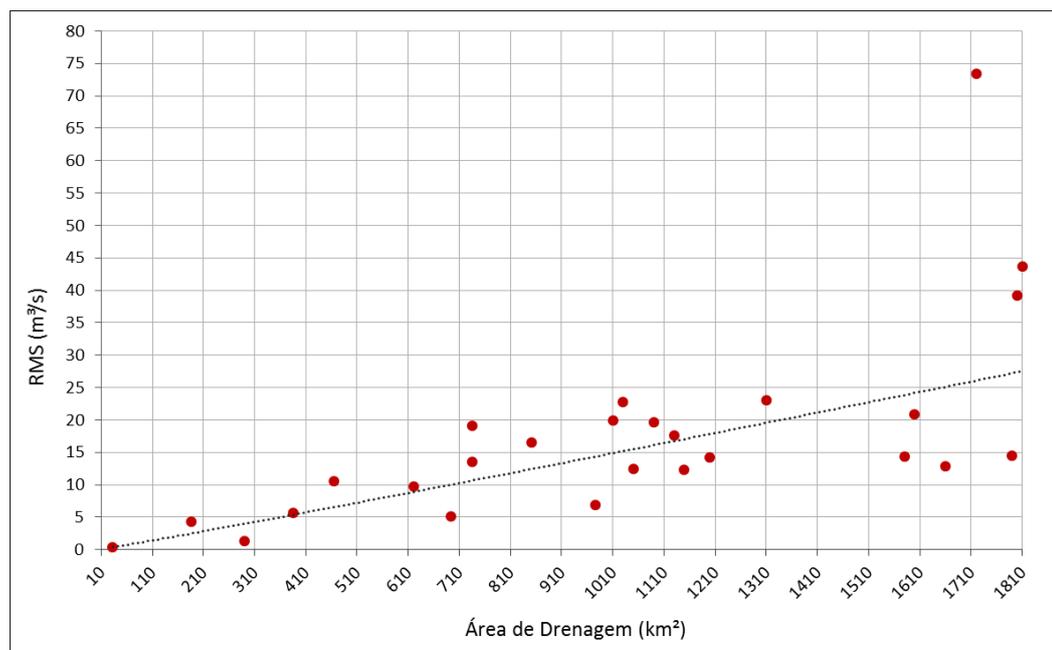
De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, nota-se que, com exceção das bacias BT16 e BT23, os valores da decalagem (*k*) indicaram que são necessários 2 ou 3 dias para que toda chuva que cai na bacia seja convertida em vazão. Resultado que caracteriza pequenas bacias hidrográficas, mostrando o sucesso da aplicação do MLS em relação aos objetivos da pesquisa. Já os resultados do comprimento de memória *m* descreveram que são necessárias amostras de mais 100 dias de dados para que se estabeleça a correlação cruzada entre os dados de chuva e vazão e se determine a resposta impulsional do sistema. Apenas as bacias BT2 e BT15 apresentaram valores de *m* abaixo de 100. Segundo Quintas et al. (2011), quando a resposta impulsional do sistema apresenta valores baixos do comprimento de memória

m , as vazões de cheia são melhores estimadas, enquanto que valores elevados de m são mais apropriados para estimar as vazões de estiagem. Este fato pode ser observado nos hidrogramas diários e nas curvas de permanência da calibração do modelo gerados para cada BT (Apêndice III).

Na etapa de calibração do modelo foram gerados para cada BT hidrogramas diários observados e simulados, sendo este último obtido com os parâmetros ótimos m e k (Tabela 2). Através dos hidrogramas é possível verificar que o modelo capta bem o sinal da chuva, que simula o sinal da vazão, porém há subestimações e superestimações de vazões em todos os hidrogramas. Este fato pode ser confirmado pela observação das curvas de permanência (Apêndice III).

Ainda de acordo com os resultados da Tabela 2, percebe-se que os valores de RMS aumentam linearmente nas bacias BT1, BT2, BT3 e BT4. Após o resultado da bacia BT4, os valores de RMS começam a oscilar, apresentando um comportamento não linear, fato este que pode estar atrelado às dimensões das bacias hidrográficas. Para confirmar se o tamanho da bacia influencia no desempenho do MLS traçou-se um gráfico que correlaciona os valores de RMS , obtidos na calibração do modelo, com as áreas de drenagem de cada BT (Figura 13).

Figura 13 - Relação entre a área de drenagem e o RMS da calibração de cada BT.

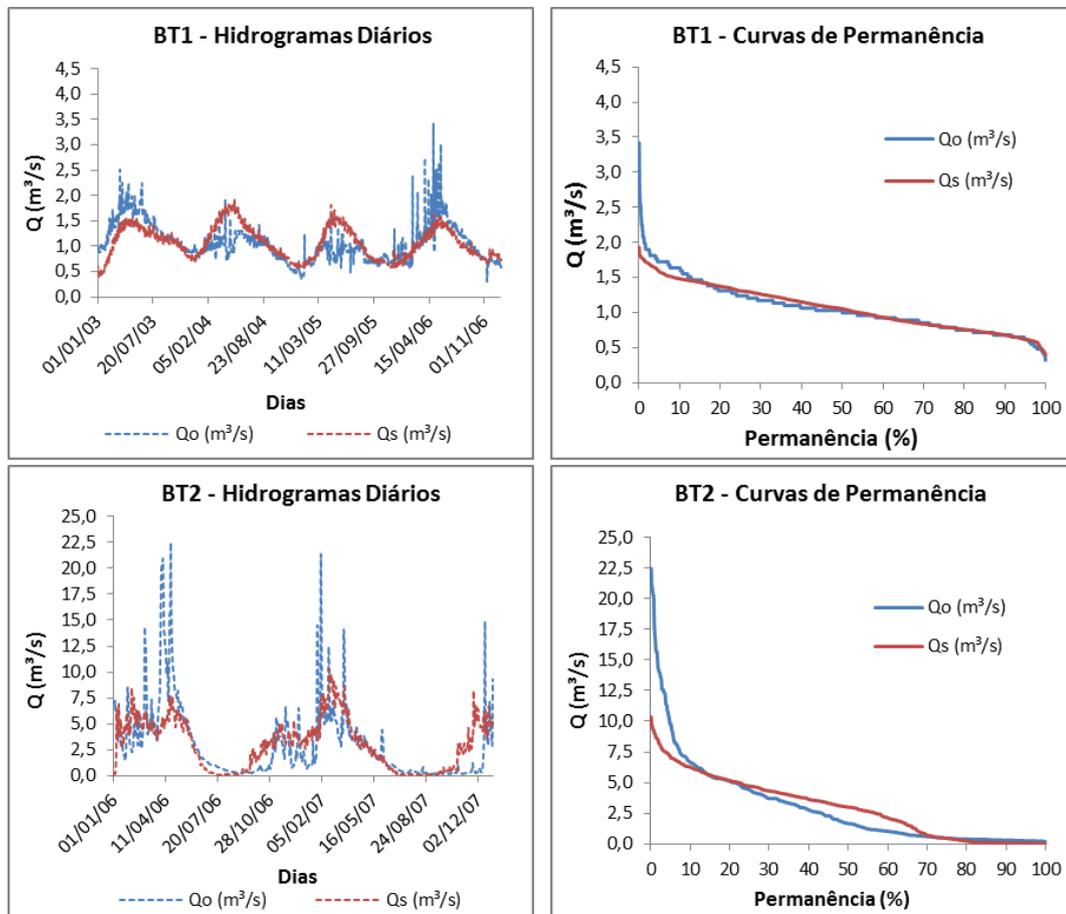


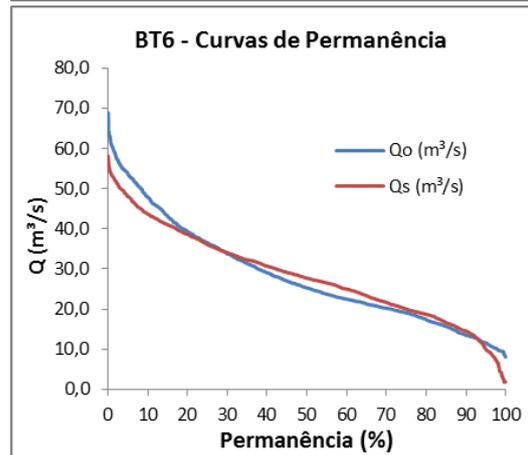
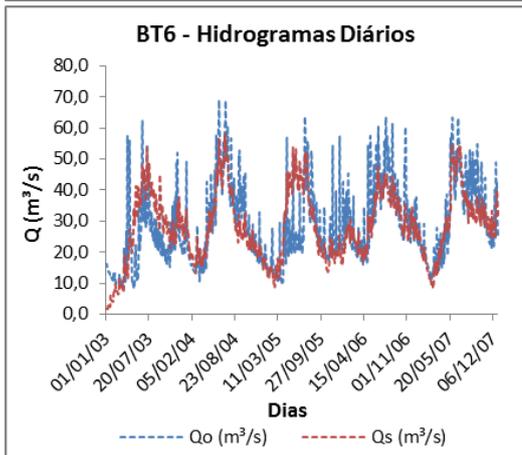
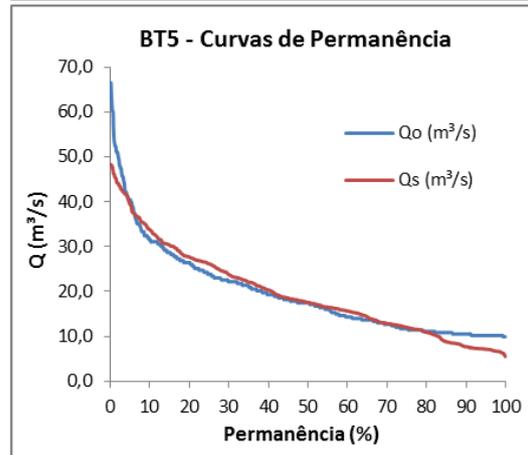
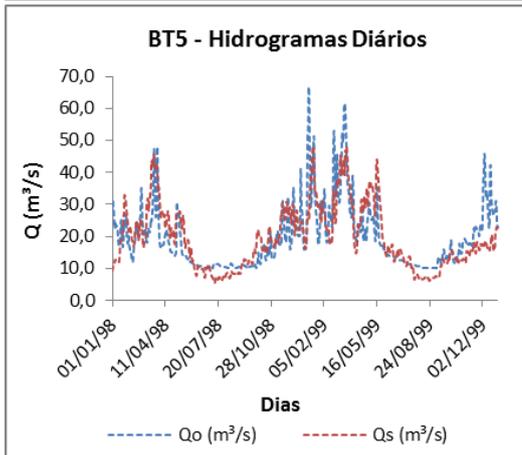
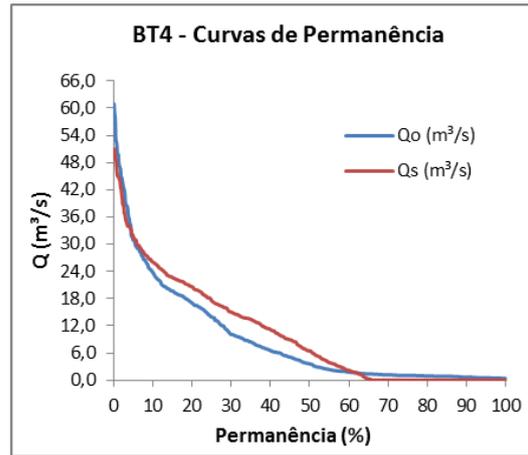
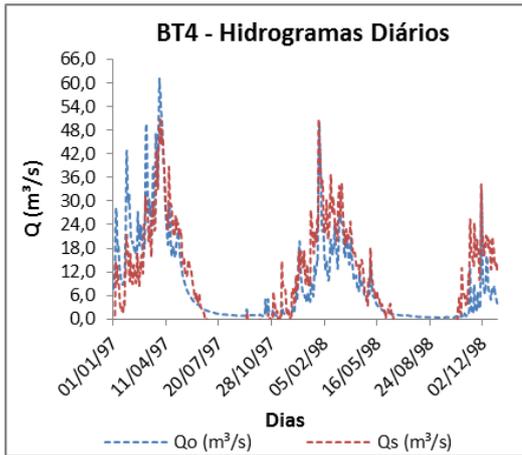
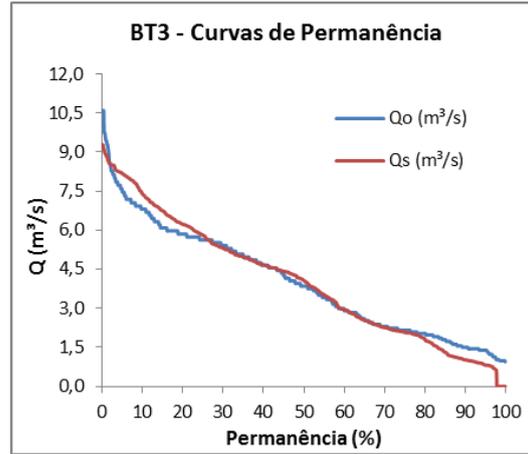
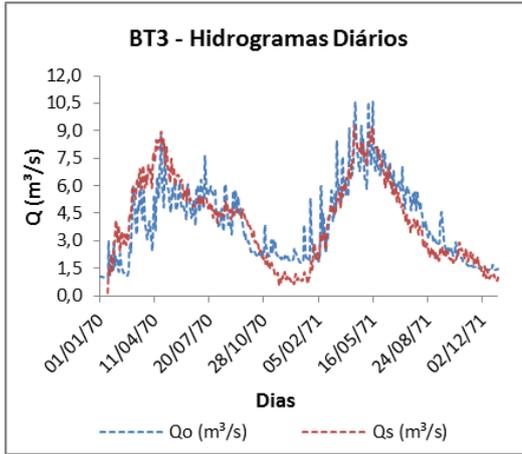
Observando-se a Figura 13, ratifica-se que nas primeiras 4 bacias testes o valor do RMS aumenta à medida que o valor da área de drenagem aumenta, com um pequeno desvio da BT3. Percebe-se também que a partir da BT5, que possui uma área de 465 km², o RMS começa a

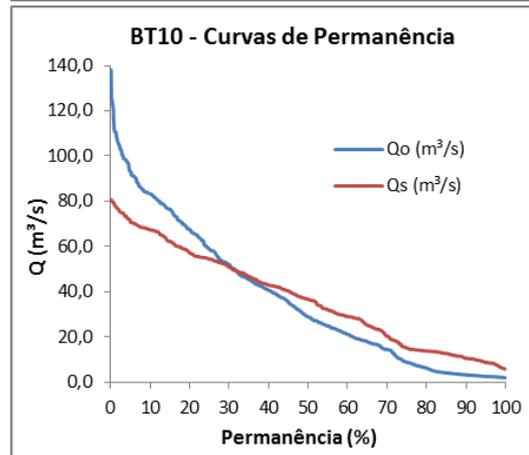
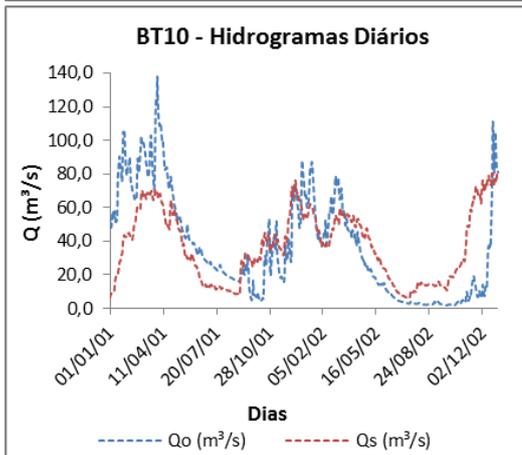
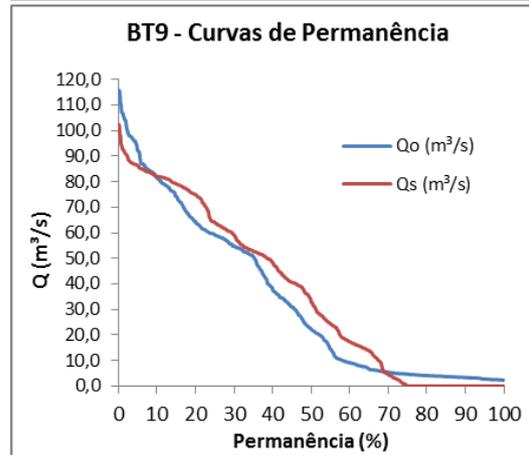
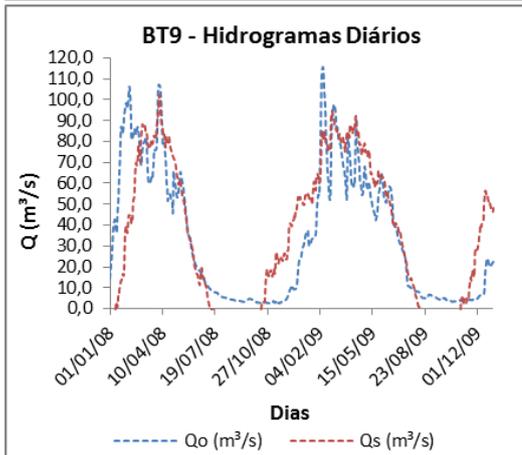
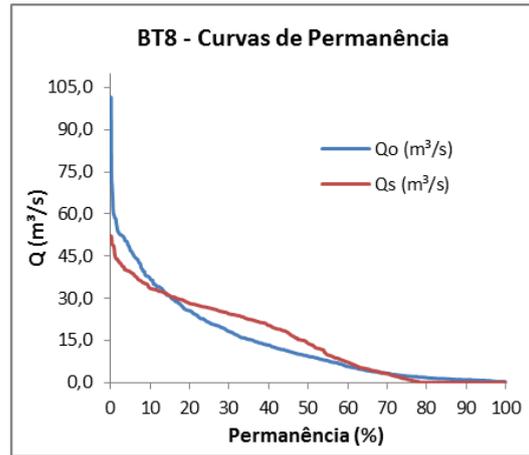
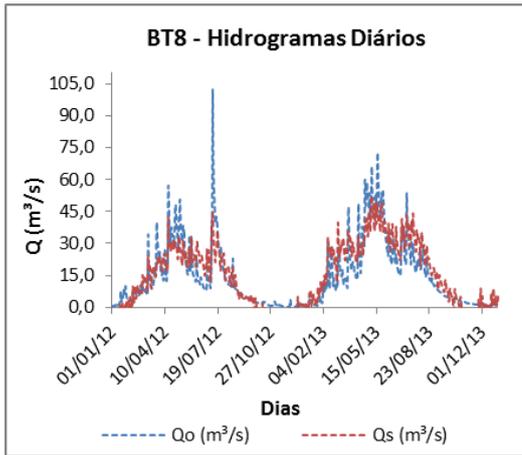
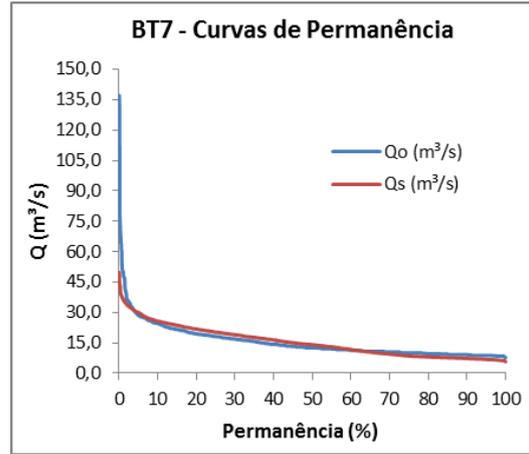
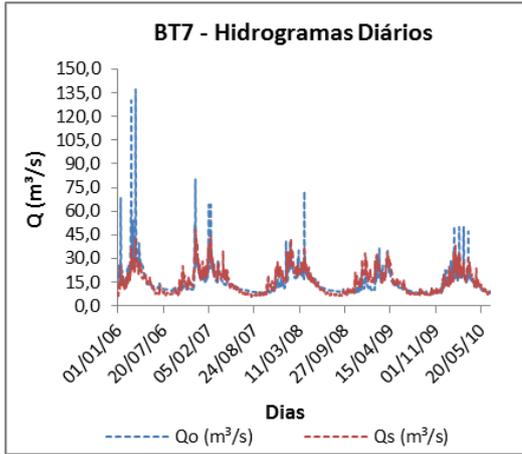
apresentar grande variabilidade, com valores acima de $6 \text{ m}^3/\text{s}$, exceto a BT7. Vale lembrar que o *RMS* avalia o desempenho do modelo, e quanto menor o valor melhor será o ajuste entre os valores simulados e observados. Neste contexto e com base no gráfico, pode-se afirmar que à medida que a área da bacia aumenta o desempenho do modelo cai. Este fato é explicado pela hipótese atrelada ao MLS, que estabelece uma relação linear de causa e efeito entre os dados de chuva e vazão, relação esta que é descrita em bacias com pequenas dimensões. Acredita-se que na validação os valores de *RMS* diminuirão, uma vez que o modelo estará calibrado.

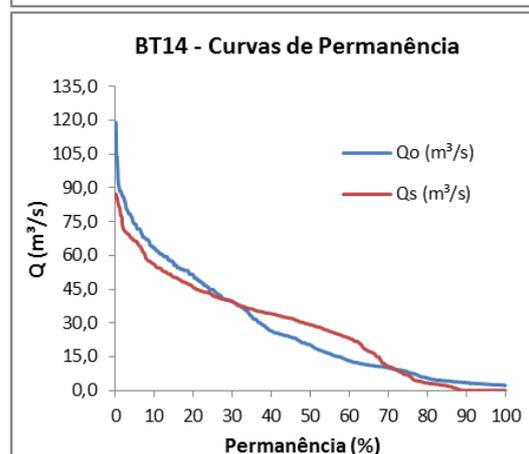
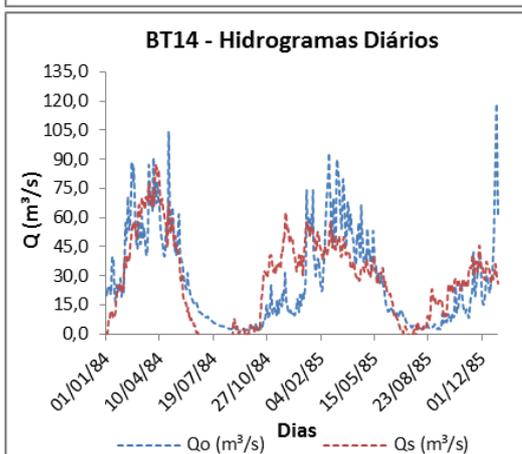
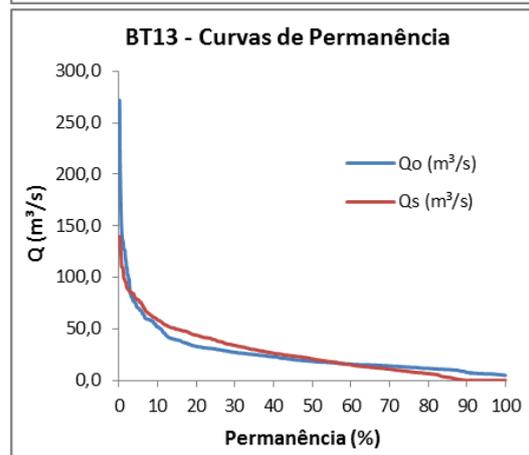
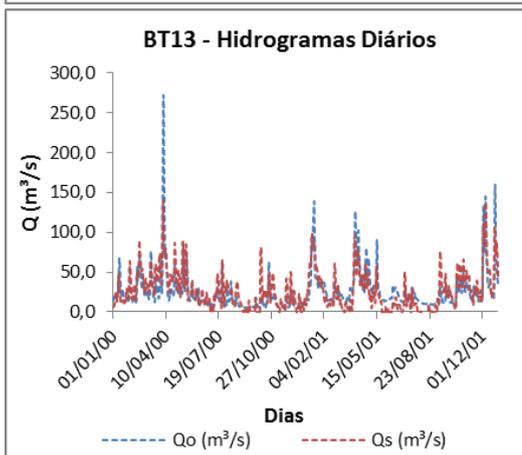
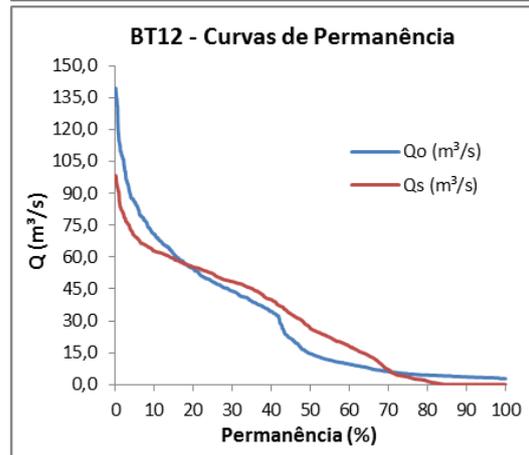
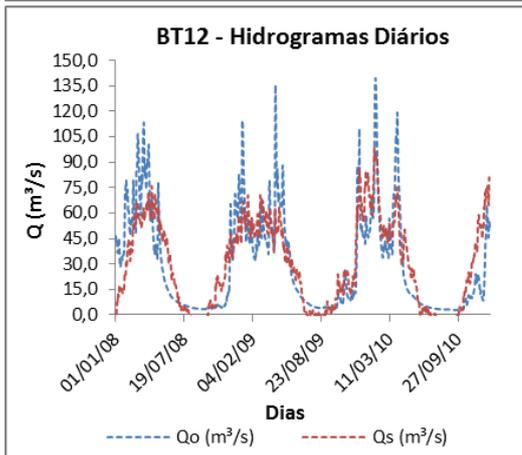
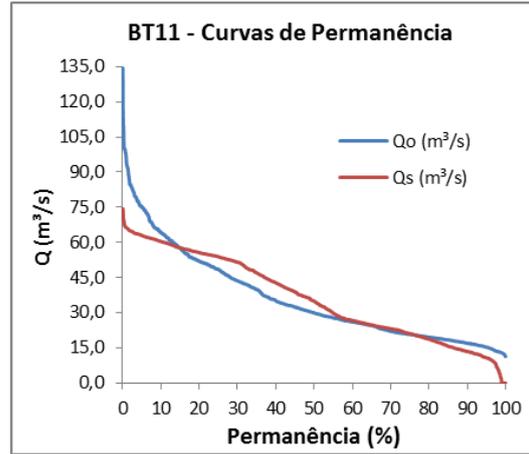
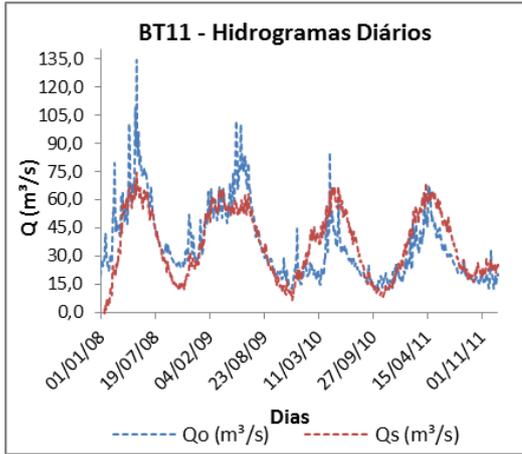
Para o processo de validação do modelo, a convolução discreta foi aplicada aos dados de chuva e vazão utilizando-se os parâmetros ótimos, m e k , determinados na calibração (Tabela 2). A validação foi aplicada aos últimos anos de dados das bacias testes (Tabela 1). Para cada BT foram gerados gráficos com os hidrogramas diários e as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas (Figura 14).

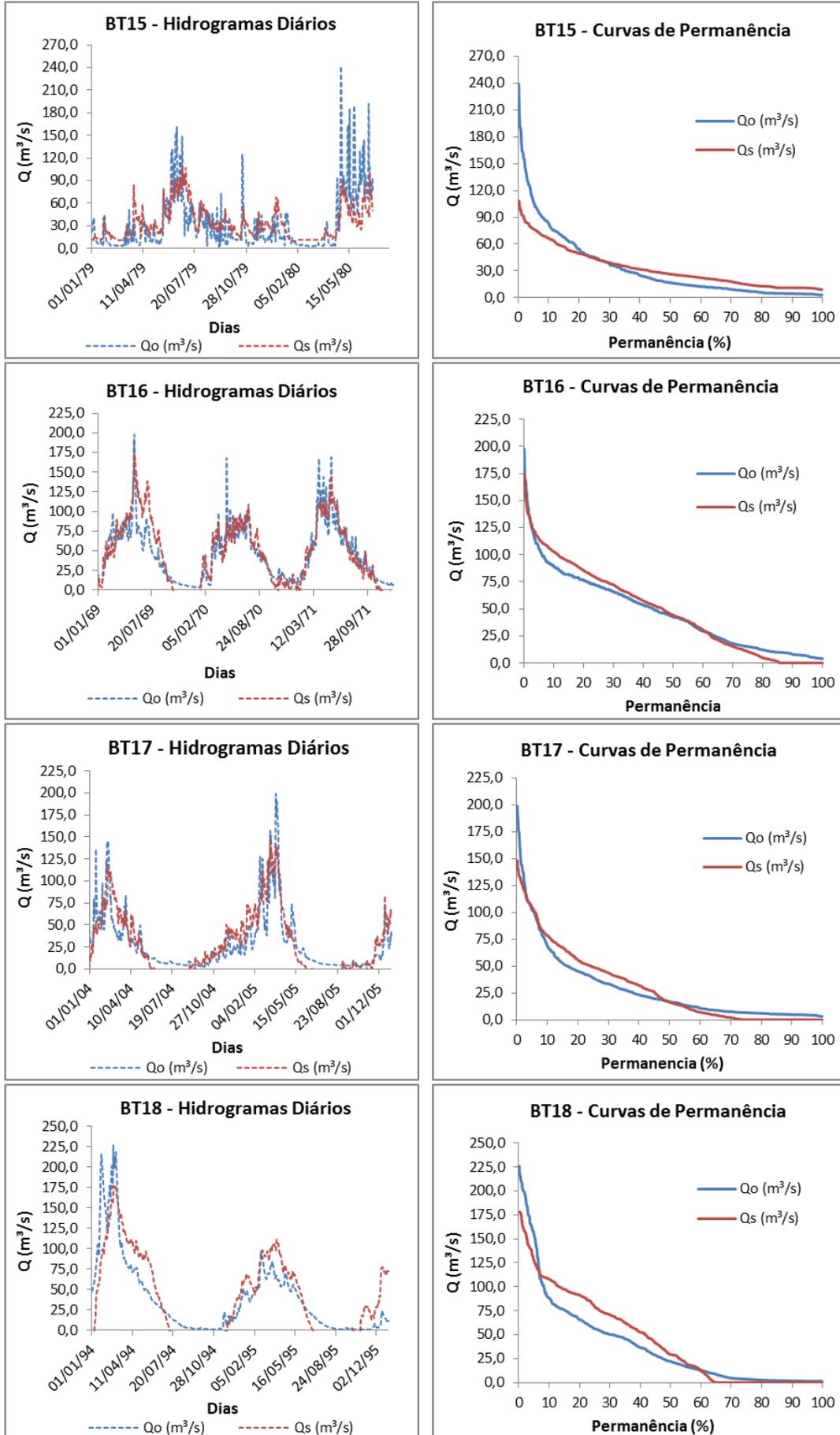
Figura 14 - Hidrogramas diários e curvas de permanência da validação do MLS nas bacias testes.

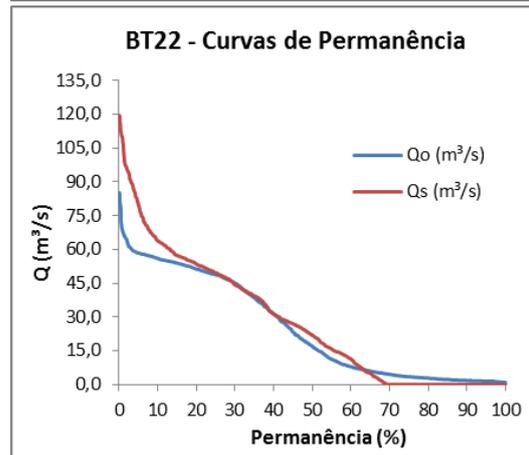
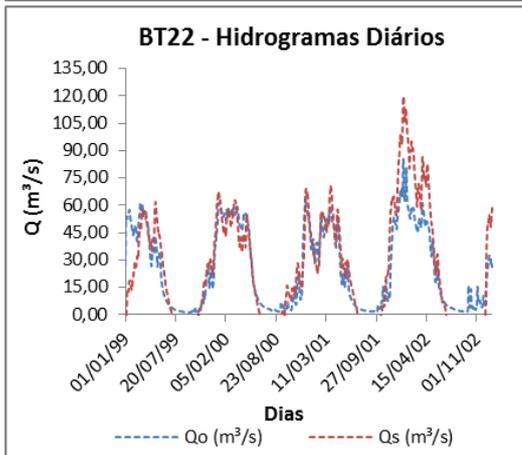
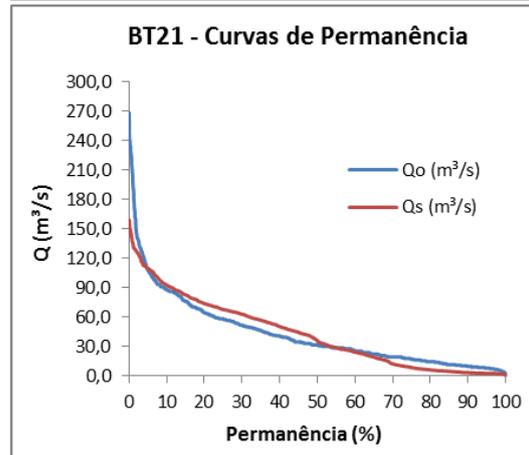
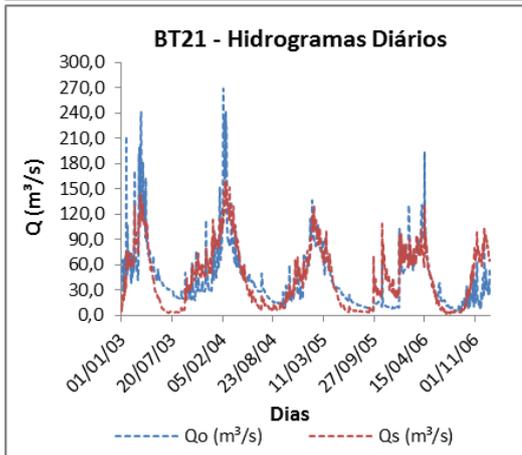
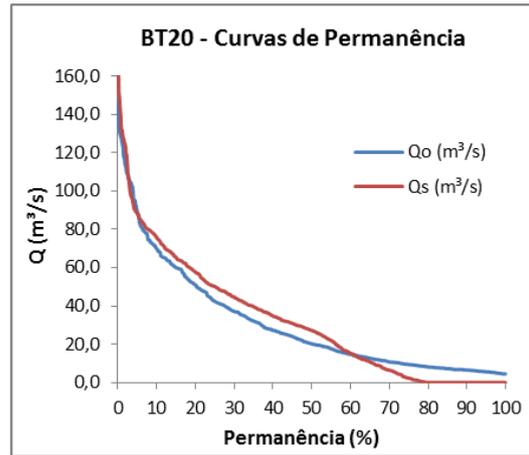
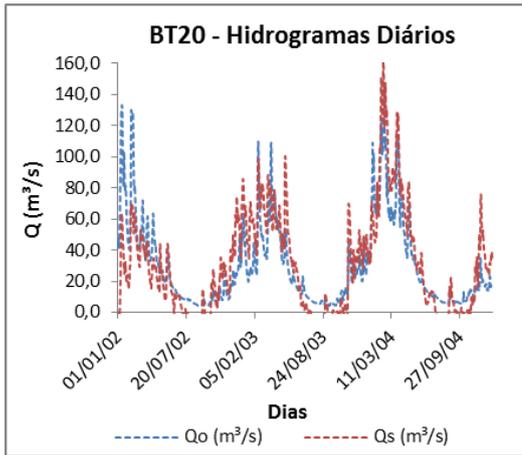
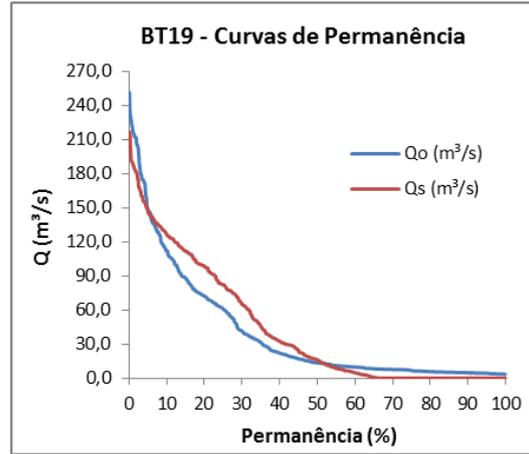
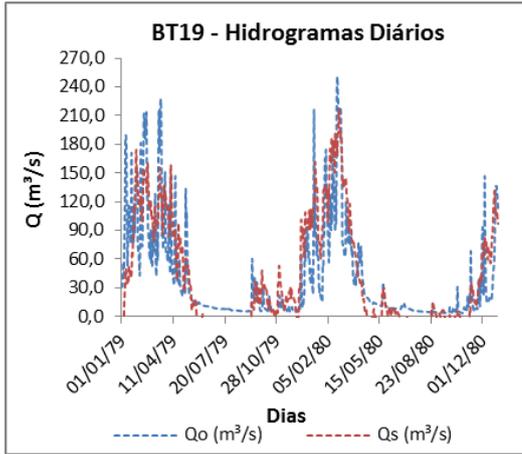


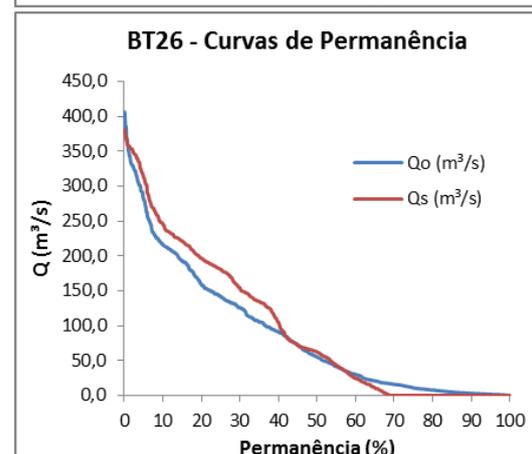
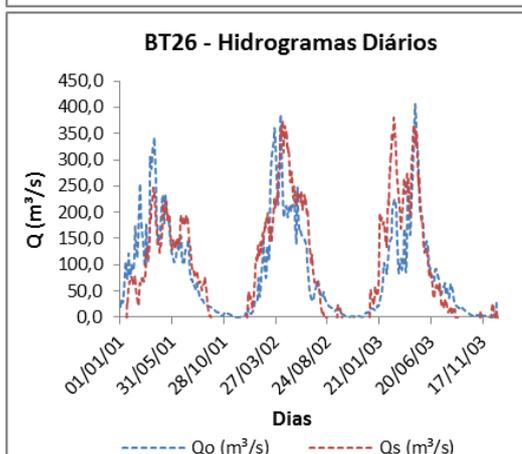
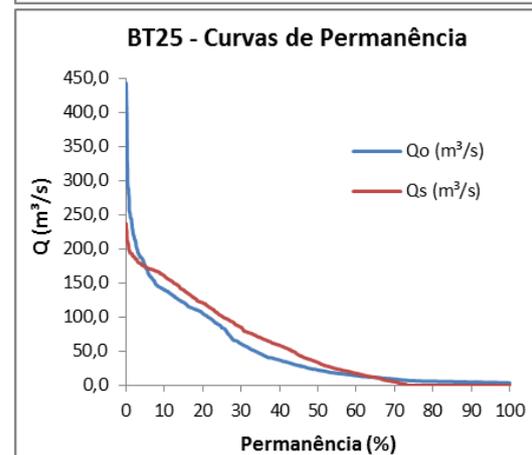
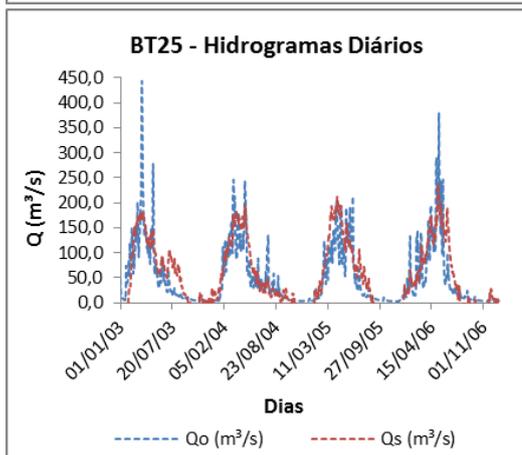
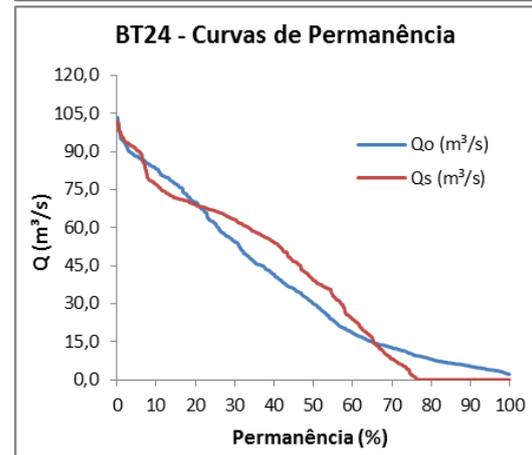
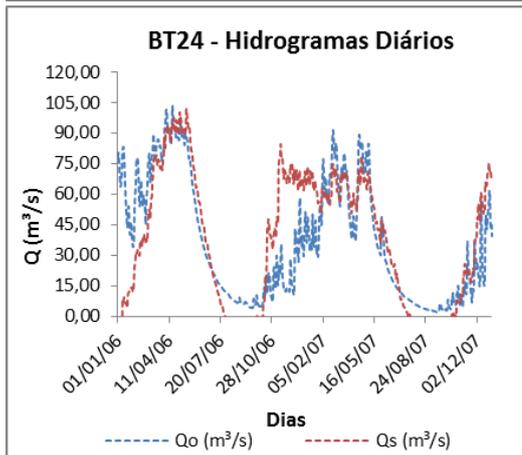
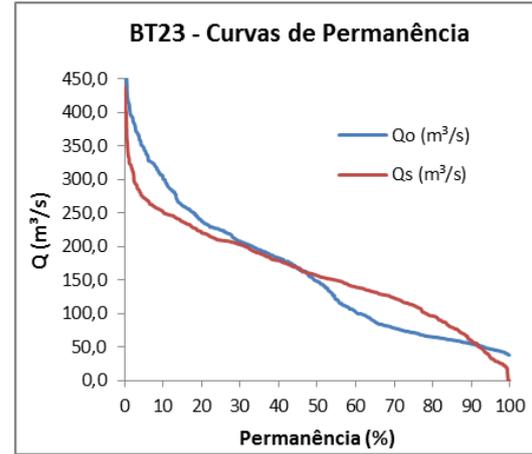
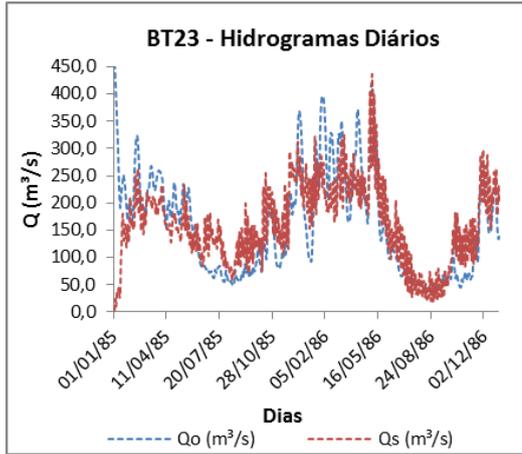












Observando os hidrogramas diários da validação das BT (Figura 14), percebe-se que, de maneira geral, o modelo captou bem o sinal da chuva que simulou o sinal da vazão, porém em todos os hidrogramas se observa subestimações e superestimações de vazões. As exceções são as bacias BT9, BT10, BT14 e BT18, as quais apresentaram diferenças relevantes entre os hidrogramas observados e simulados, fato esse comprovado pelas curvas de permanência entre as vazões observadas e simuladas dessas BT. As áreas de drenagem podem justificar essa diferença entre os hidrogramas observados e simulados dessas bacias, que possuem dimensões variando entre 735 e 1200 km² (Tabela 1). Esses valores são bem maiores quando comparados aos das BT utilizadas por Blanco et al. (2013), que aplicaram o mesmo MLS em bacias com áreas de 82 e 55 km², e obtiveram resultados satisfatórios entre as curvas de permanência observadas e simuladas. Os resultados apresentados nos hidrogramas das bacias BT9, BT10, BT14 e BT18 sugerem que a área de drenagem influencia diretamente no desempenho do modelo, e à medida que a dimensão da bacia aumenta o modelo começa a falhar, apresentando diferenças significativas entre as vazões observadas e simuladas.

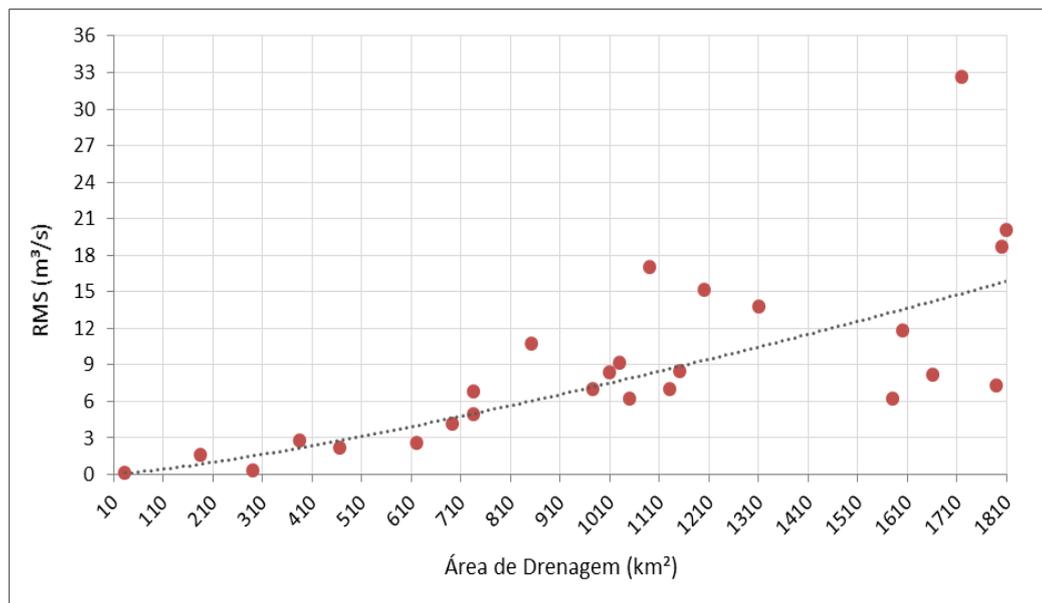
Analisando as curvas de permanência, nota-se que na etapa de validação o modelo obteve um desempenho melhor, pois a aproximação entre as curvas das vazões observadas e simuladas foi maior que na etapa de calibração. As primeiras 7 BT foram as que apresentaram os melhores resultados, pois quando compara-se as curvas de permanência observada e simulada da calibração (Apêndice III) com as da validação (Figura 14) do modelo percebe-se um ajuste melhor entre as curvas de permanência dessas bacias.

Ainda observando as curvas de permanência da validação do modelo (Figura 14), percebe-se que a partir da bacia BT8, as curvas de permanência observada e simulada apresentaram um comportamento dissimilar entre si, sugerindo que o MLS não simulou bem o sinal da vazão. No entanto, vale ressaltar que algumas bacias desse grupo, que são a BT13, BT15, BT16, BT17, BT20, BT21 e BT25, apresentaram um bom ajuste entre as vazões de permanência observadas e simuladas, fato que pode indicar que nessas bacias o modelo obteve um bom desempenho. Contudo, ao verificar os resultados da calibração (Apêndice III) dessas bacias, nota-se que a aproximação entre as curvas foi semelhante aos resultados da validação (Figura 14), não havendo grandes diferenças entre os resultados das duas etapas, diferentemente do que ocorreu nas primeiras 7 BT.

Os resultados das curvas de permanência sugerem que a partir da bacia BT8, o desempenho do MLS começou a cair e o ajuste entre as vazões observadas e simuladas tende a ser pior. Isto ocorre porque a hipótese atrelada ao modelo, que estabelece uma relação linear de causa e efeito entre os dados de chuva e vazão, só pode ser observada em pequenas bacias

hidrográficas e à medida que a dimensão da bacia aumenta a hipótese é desfavorecida. Para se confirmar a influência da dimensão da bacia no desempenho do MLS, bem como classificar as pequenas bacias hidrográficas em função da área de drenagem, calculou-se, para cada BT, o *RMS* entre as curvas de permanência observada e simulada da etapa de validação do modelo. Os valores de *RMS* obtidos foram plotados em um gráfico junto com os valores de área de drenagem das BT, a fim de se observar o comportamento entre essas duas variáveis (Figura 15).

Figura 15 - Relação entre a área de drenagem e o *RMS* da validação de cada BT.



O gráfico da Figura 15 confirma a relação linear entre o desempenho do MLS chuvavazão e área de drenagem da bacia, uma vez que o valor de *RMS* aumenta à medida que a área da bacia aumenta. Este resultado indica que quanto maior a dimensão da BT pior será o ajuste entre os dados observados e simulados, diminuindo o desempenho do modelo. Observando os valores de *RMS* da validação, nota-se que esses foram menores que os da calibração (Figura 13), indicando que os dados observados e simulados obtiveram melhores ajustes na etapa de validação. Na calibração do modelo o *RMS* variou de 0,40 a 73,47 m³/s (Figura 13), enquanto que na validação o valor mínimo foi de 0,10 m³/s e o valor máximo não ultrapassou 33 m³/s.

A Figura 15 confirma os resultados apresentados nas curvas de permanência observada e simulada da validação do modelo (Figura 14), que indicaram que as primeiras 7 BT alcançaram os melhores resultados, obtendo um melhor ajuste entre as vazões observadas e simuladas. Todavia, nota-se que o resultado de *RMS* da bacia BT7 ultrapassou 3 m³/s, enquanto as demais apresentaram *RMS* abaixo desse valor. O resultado da BT7 é explicado pela diferença entre as

vazões de baixa frequência observadas e simuladas, as quais foram subestimadas pelo MLS, implicando em um pior ajuste entre os dados e, por conseguinte, em um valor maior de *RMS*.

Analisando os resultados de *RMS* (Figura 15) e as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas da validação (Figura 14), pode-se afirmar que a área de drenagem da bacia influencia diretamente no desempenho do MLS. Conforme a dimensão da bacia aumenta, o desempenho do modelo diminui, e a hipótese de linearidade entre os dados de chuva e vazão é desfavorecida. Sendo assim, com base nas curvas de permanência e nos resultados de *RMS* da etapa de validação, apenas as bacias BT1, BT2, BT3, BT4, BT5 e BT6 apresentaram resultados satisfatórios, apresentando valores de *RMS* abaixo de 3 m³/s. Quanto mais próximo de 0 (zero) o *RMS*, melhor será o ajuste entre os dados observados e simulados. Este resultado indica que nessas bacias a hipótese do MLS chuva-vazão foi favorecida, permitindo tratá-las como pequenas bacias hidrográficas.

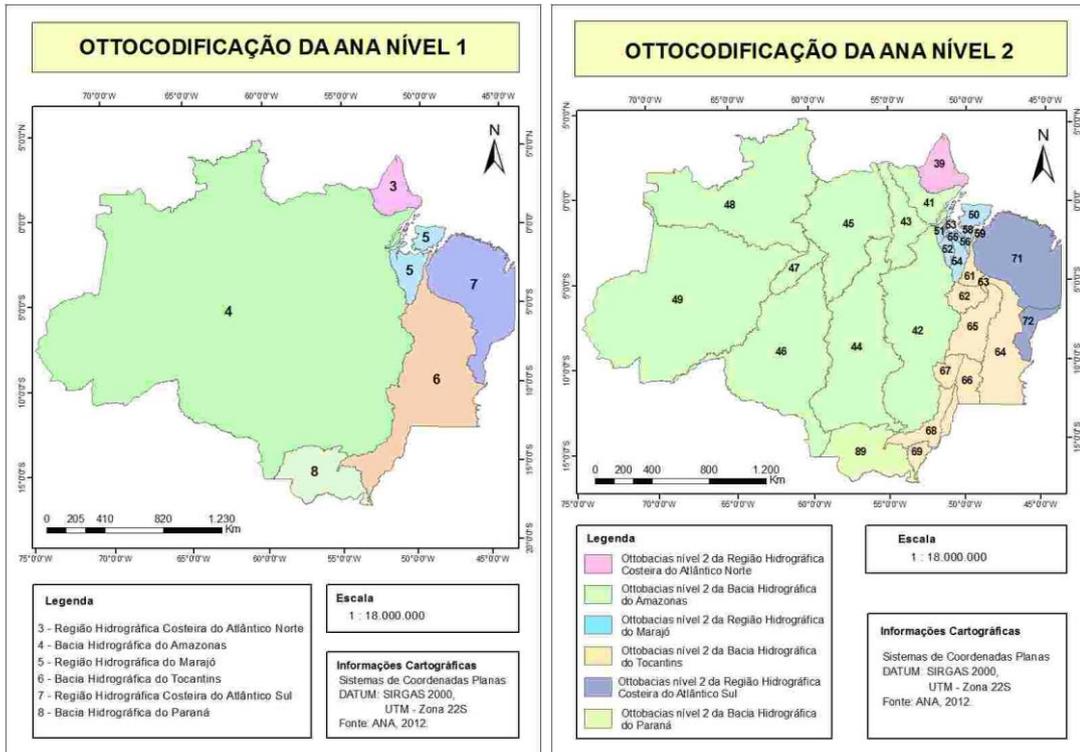
Neste contexto, sugere-se que, na Amazônia pequenas bacias hidrográficas são aquelas que possuem áreas de drenagem ≤ 620 km². Esse resultado está próximo aos valores sugeridos por Tucci e Clarke (2003) e por Tucci (2004), que classificam pequenas bacias hidrográficas aquelas com áreas de drenagem < 300 km² e < 500 km², respectivamente.

5.2 OTTOCODIFICAÇÃO DAS PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

O método de Otto Pfafstetter foi aplicado às bacias hidrográficas da Amazônia Legal com o objetivo de se identificar em qual nível de ramificação são encontradas apenas pequenas bacias hidrográficas, as quais foram definidas em função da área de drenagem, conforme descrito no tópico anterior.

O sistema de informações da ANA disponibiliza, para o Brasil, as bacias ottocodificadas até o nível 6. Vale ressaltar que, a metodologia de Otto foi aplicada considerando o conjunto de bacias da América do Sul, a qual foi detalhada posteriormente para as bacias hidrográficas brasileiras. Para este estudo a ottocodificação foi aplicada a partir do nível 2 fornecida pelo banco de dados da ANA (Figura 16).

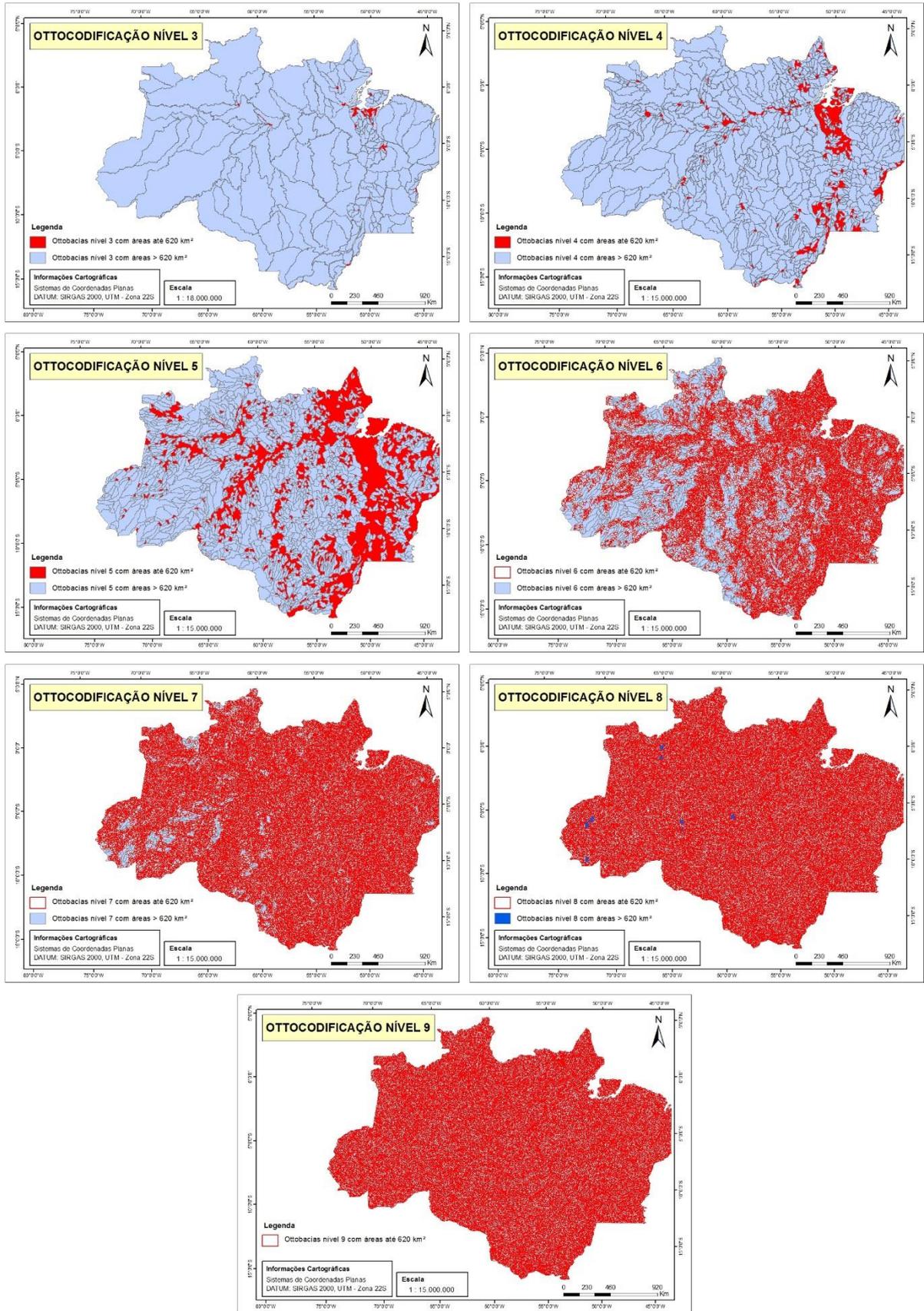
Figura 16 – Ottocodificação da ANA aplicada às bacias hidrográficas da Amazônia Legal.



Os mapas da Figura 16 apresentam os níveis 1 e 2 da ottocodificação aplicada pela ANA. Nota-se que o primeiro nível dividiu a Amazônia Legal em seis grandes bacias, sendo a de número 4, a bacia hidrográfica do Amazonas, a maior de todas, com uma área de aproximadamente 3.900.000 km². Ressalta-se que esse valor engloba apenas os limites brasileiros. As bacias hidrográficas do Tocantins e do Paraná, que receberam os códigos 6 e 8, respectivamente, também possuem os tributários com as maiores áreas de contribuição, visto que, conforme a metodologia de Otto, os números pares identificam as bacias com as maiores áreas. Já as regiões hidrográficas Costeira do Atlântico Norte, Marajó e Costeira do Atlântico Sul, que receberam os códigos 3, 5 e 7, são conhecidas como “interbacias”, que são as áreas de contribuição delimitadas pelas maiores bacias. No nível 2 da ottocodificação as 6 bacias do nível 1 foram divididas em 32 ottobacias (Figura 16). Vale lembrar que, ambos os mapas, apresentam os limites da Amazônia Legal, por isso nem todas as ottobacias das regiões hidrográficas Costeira do Atlântico Norte e Costeira do Atlântico do Sul, e da Bacia hidrográfica do Paraná estão representadas, uma vez que se encontram fora dessa delimitação.

Utilizando o MDEHC extraído da Amazônia Legal e partindo-se do nível 2 da ottocodificação definido pela ANA (Figura 16), onde foram encontradas 32 ottobacias, o método de Otto foi novamente aplicado. Esse processo foi repetido até o nível 9 da ottocodificação, onde foram encontradas ottobacias com áreas de até 620 km² (Figura 17).

Figura 17 – Níveis da Ottocodificação aplicada às bacias hidrográficas da Amazônia Legal.



Observando os mapas da Figura 17, nota-se que os níveis 3 e 4 da ottocodificação das bacias da Amazônia Legal apresentaram o menor número de pequenas bacias, 76 e 1100 ottobacias com áreas de até 620 km², respectivamente. No nível 5 foram delimitadas 9.886 bacias no total, sendo que dessas, 8.006 possuem áreas \leq 620 km², definidas como pequenas bacias hidrográficas. No nível 6 da ottocodificação foram encontradas 30.372 ottobacias, das quais 29.186 foram classificadas como pequenas bacias hidrográficas. No nível 7 e no nível 8, que encontraram no total 46.411 e 50.901 ottobacias, respectivamente, o número de pequenas bacias hidrográficas identificadas foi de 46.200 no nível 7 e 50.893 no nível 8 da ottocodificação. Por fim, no nível 9 foram delimitadas 51.319 ottobacias, as quais possuem áreas de drenagem \leq 620 km², ou seja, todas classificadas como pequenas bacias hidrográficas. Assim, os resultados da ottocodificação indicam que, para se obter apenas pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal é necessário aplicar a metodologia de Otto Pfafstetter até o nível 9.

6. CONCLUSÃO

O modelo linear chuva-vazão apresentou resultados satisfatórios quando aplicado aos dados hidrológicos das bacias testes com áreas menores ou iguais a 620 km². Os resultados também indicaram que existe uma relação diretamente proporcional entre o desempenho do modelo e a área da drenagem da bacia, a qual foi observada através dos valores *RMS* obtidos entre as curvas de permanência observada e simulada.

Os resultados de *RMS* demonstraram que em bacias hidrográficas menores que 620 km², o ajuste entre as curvas de permanência observadas e simuladas é melhor, apresentando resultados abaixo de 3 m³/s. Já nas bacias testes com áreas maiores que 620 km², o *RMS* foi maior que 4 m³/s, chegando a ultrapassar os 30 m³/s, indicando que nessas bacias o MLS não obteve bom desempenho, uma vez que as vazões de permanência observadas e simuladas não apresentaram bom ajuste entre si.

Assim, sugere-se que, na Amazônia as pequenas bacias hidrográficas são aquelas com áreas de drenagem ≤ 620 km², pois a hipótese de linearidade entre os dados de chuva e vazão, atrelada ao MLS, é mais favorecida, indicando que o modelo não falha quando aplicado aos dados hidrológicos dessas bacias. Contudo, é necessário testar o modelo em um número maior de bacias hidrográficas. Logo, sugere-se como trabalho futuro, o monitoramento de outras pequenas bacias hidrográficas para se avaliar ainda mais a metodologia apresentada.

A metodologia de Otto Pfafstetter foi aplicada às bacias hidrográficas da região da Amazônia Legal para se identificar em que nível são encontradas apenas pequenas bacias hidrográficas, ou seja, bacias com áreas ≤ 620 km². O método foi aplicado até o nível 9, onde foram delimitadas 51.319 ottobacias, todas classificadas como pequenas bacias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. M. de. **Análises hidrogeomorfológicas para comparação de duas bacias hidrográficas contribuintes do reservatório de Itaipu**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- ALBUQUERQUE, E. L. S.; DE SOUZA, M. J. N. Condições ambientais e socioeconômicas nas bacias hidrográficas costeiras do setor leste metropolitano de Fortaleza, Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, n. 1, p. 110-124, 2016.
- ALTAF, F.; MERAJ G.; ROMSHOO, A. S. Morphometric analysis to infer hydrological behavior of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. **Geography Journal**, v. 2013, p. 1-14, 2013.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Rev. FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129 - 137, jan./jun. 2017.
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, M. T. Análise morfométrica da bacia hidrográfica riacho Namorado, São João do Cariri-PB: uma ferramenta ao diagnóstico físico. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 31, n. 3, 2014.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 2015.
- ANDREWS, F. T., CROKE, B. F. W., JAKEMAN, A. J. An open software environment for hydrological model assessment and development. **Environ. Model. Softw.** v. 26, 1171 – 1185, 2011.
- ANGILLIERI, E. Y. M. Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazards, San Juan, Argentina. **Quaternary International**, v. 253, p. 74-79, 2012.
- ARAÚJO, J.C.; KNIGHT, D.W. A review of the measurement of sediment yield in different scales. **Revista Escola de Minas**, 53:257- 265, 2005.
- ARNOLD, N. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. **Progress in Physical Geography**, v. 34, n. 6, 781–809, 2010.
- BARTOLETTI, N. et al. Data-driven rainfall/runoff modelling based on a neuro-fuzzy inference system. **Environmental Modelling & Software**. 2017.
- BASTOS, T. X. **O clima na Amazônia Brasileira segundo Koppen**. Belém, PA: EMBRAPA-CPATU, 1982.
- BLANCO, C. J. C. *et al.* Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 32, p.803-811, 2005.

BLANCO, C. J. C. *et al.* Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall–runoff models to simulate flow duration curves. **Hydrological Sciences Journal**, v.58, p.1–11, 2013.

BLANCO, C. J. C.; SECRETAN, Y.; FAVRE, A. C. Análise, aplicação e transposição de um modelo chuva-vazão para simulação de curvas de permanência de pequenas bacias da Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.12, n.1, 2007.

BRANDÃO, P. C. *et al.* Caracterização de geoambientes da floresta nacional do purus, Amazônia ocidental: uma contribuição ao plano de manejo. **Rev. Árvore** [online]. v.34, n., p.115-126, 2010.

BRASIL. Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos**.

BRUNO, L.O. GRASS. A free and open source solution for hydrographic body analysis. **Nativa**, v.5, n.1, p.24-30, 2017.

CHANDWANI, V. *et al.* Soft computing approach for rainfall-runoff modelling: A review. **Aquatic Procedia**, v.4, 1054 – 1061, 2015.

CHANDRASHEKAR, H.; LOKESHB, K. V.; SAMEENAC, M.; ROOPAD, J.; RANGANNAE, G. GIS –Based Morphometric Analysis of Two Reservoir Catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka. **Aquatic Procedia**, v. 4, 1345 – 1353, 2015.

CHATFIELD, C. (1980) “**The Analysis of Time Series: An Introduction**”, 2nd ed, London, England, Chapman and Hall, 333p.

CHEREM, L. F. S.; JÚNIOR, A. P. M.; FARIA, S. D. Análise e compartimentação morfométrica da bacia hidrográfica do Alto Rio das Velhas – Região Central de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 1, p.11-21, 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2ª ed. 188p. 1980.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 472p. 2005.

COSTA, M. H. *et al.* Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283 206–217. 2003.

CRUZ, R. C.; TAVARES, I. S. Bacia hidrográfica: aspectos conceituais e práticos. In: RIGUES, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. (Org.). **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria, RS: Centro Universitário Franciscano, cap.3, 2009.

CUNHA, S. B. Geomorfologia fluvial. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

DAVIDSON, E. A., *et al.* The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, 321-328, doi:10.1038/nature10717. 2012

DBOUK, W.; JAMALI, I. Predicting daily oil prices: linear and non-linear models. **Research in International Business and Finance**. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2018.01.003>. 2018.

ELESBON, A. A. A. et al. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus - Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 3, p. 281-288, 2011.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ARC/INFO v.7.1.1. Help on Line**. Redlands, Califórnia: ESRI, 1997.

FAYAL, M. A. de A. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 158 p., 2008.

FONSECA, S. F.; SANTOS, D. C.; HERMANO, V. M. Geoprocessamento aplicado á análise dos impactos socioambientais urbanos: estudo de caso do bairro Santo Expedito em Buritizeiro/MG. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 30, n. 3, 2013.

FONTES, S. B.; PEJON, O. J. Proposal of a geo-environmental zoning method based on Ottobasin compartmentalization. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.67, p.555-563, 2008.

FREITAS, H. R. D. A.; FREITAS, C. D. C.; ROSIM S.; OLIVEIRA, J. R. D. F. Drainage networks and watersheds delineation derived from TIN-based digital elevation models. **Computers & Geosciences**, v. 92, 21–37, 2016.

GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE. p.2511-2518.

GANORA, D., *et al.* An approach to estimate nonparametric flow duration curves in ungauged basins. **Water Resources Research**, 45, W10418, doi:10.1029/2008WR007472. 2009.

GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrográficas: conceitos básicos. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p.3-13, 2003.

GOMES, C. A. *et al.* Ottocodificação e extração das características físicas por meio de SIG da bacia do rio Capivari. In: **Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, Brasil, 27/nov. – 01/dez. 2011.

GRANELL-PÉREZ, M. D. C. **Trabalhando geografia com as cartas topográficas**. Ed. Unijuí: Ijuí, Rio Grande do Sul. p.128, 2001.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 648p. 2011.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v.56, n.3, p.275-370, 1945.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v.106, n.3-4, p.211-232, 1989.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/amazonialelegal.shtm?c=2>>. Acesso em: julho de 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geoestatísticas de recursos naturais da Amazônia Legal – 2003**. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

IPAM. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. **Arco do Desmatamento**. Disponível em <<http://ipam.org.br/glossario/arco-do-desmatamento/>>. Acesso em: março de 2018.

JÚNIOR, G. B. M.; CONTINI, E.; NAVARRO, Z. **Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo**. Brasília, DF: Embrapa Estudos e Capacitação, 2011.

KERAMATLOU, I. et al. Um modelo linear simples para estimativa de área foliar em noqueira persa (*Juglans regia* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 184, 36-39, 2015.

KIPLANGAT, D. C., ASOKAN, K., KUMAR, K. S. Improved week-ahead predictions of wind speed using simple linear models with wavelet decomposition. **Renewable Energy** v. 93, 38 – 44, 2016.

KUMAR, A. R. S., et al. Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks: comparison of network types. **Hydrol. Process**. 19 (6), 1277 – 1291, 2005.

LEAL, M. S., TONELLO, K. C. Morfometria e do uso e cobertura da terra da microbacia do córrego Ipaneminha de Baixo, Sorocaba/SP. **Floresta**, v.46, n.4, p.439-446, 2017.

LIMA, K. C.; CUNHA, C. M. L.; SANTOS, J. M. Análise geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Bom Sucesso (semiárido da Bahia) através da aplicação de parâmetros morfométricos da rede de drenagem. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 2, 2010.

LIMA, W. de. **Manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz/USP, 1996.

LIU, N. Emergence, concept, and understanding of Pan-River-Basin (PRB). **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, 253–260, 2015.

MACEDO, M. N. et al. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proc. National Academy of Sciences U.S.A.**, 109 (4) 1341-1346, 2012.

MACHADO, P. J. de O.; TORRES, F. T. P. **Introdução à hidrogeografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MARCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; ROCHA, H.M. Distribuição Espaço-Temporal e Sazonalidade das Chuvas no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 16, n.4, p. 157-167, 2011.

MARINHO, C. F. C. E. **Caracterização hídrica e morfométrica do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba**. 2011. 67 f. Monografia (Especialização em Geoambiência e Recursos Hídricos do Semiárido), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, E. S. P. R.; PAIVA, J. B. D. de. Quantidade dos recursos hídricos. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p.531-566, 2003.

MELLO, C. R. de.; SILVA, A. M. da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Ed. UFLA, 455 p., 2013.

MENDONÇA, P. R. **Características hidrogeomorfológicas das bacias hidrográficas dos rios Santa Maria do Rio Doce e Santa Joana/ES**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 141p. 2013.

MENKE, A. B. **Análise de grupos para classificação de bacias hidrográficas do estado de Goiás utilizando parâmetros morfométricos**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade de Brasília, DF, 86p. 2012.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 25 ago. 2015.

MOLINIER, M. et al. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. In: **L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement**, first ed. IAHS, Paris, 209-222. 1995.

MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 8(1), p. 61-70, 2003.

MORIASI, D. B. et al. Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, Mich., v. 55, n. 4, p. 1241-1247, 2012.

NIMER, E. Clima. In: IBGE. **Geografia do Brasil/Região Sudeste** v.3. Rio de Janeiro: FIBGE, 1977.

NÓBREGA, R. S. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia Ocidental utilizando o modelo SLURP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. esp., 111 - 120, 2014.

PAN, F., STIEGLITZ, M., MCKANE, R. An algorithm for treating flat areas and depressions in digital elevation models using linear interpolation. **Water Resources Research**, v. 48, n. 6, 2012.

PESSOA, F. C. L. **Desenvolvimento de uma metodologia para regionalização de curvas de permanência de vazões da Amazônia**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade Federal do Pará – PA, 2015.

PETROSELLI, A., ALVAREZ, A., F. The flat-Area issue in digital elevation models and its consequences for rainfall-Runoff modelling. **GIScience & Remote Sensing**, 49 (5), 711–734, 2012.

PFAFSTETTER, O. **Classificação de bacias hidrográficas - metodologia de codificação**. Rio de Janeiro, RJ: DNOS, 19p. 1989.

PONCE, V. M. **Engineering Hydrology: principles and practice**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. 640p.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, v.29, n.2, p.203-212, 2005.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Amazônia Legal**. In: Anais do Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, 2, Campo Grande, 2002.

ROCHA, J. S. M.; KURTZ, S. M. J. M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 282p. 2001.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. Técnicas fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas. In: VENTURI, L. A. B. (Org.). **Praticando geografia: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, p.147-166, 2005.

RODRIGUEZ, I. The application of cross-spectral analysis to hydrologic time series. **Hydrology Papers**, Colorado State University, Fort Collins, Colo, 1967.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.2, p.1- 19, 2009.

SANTOS, D.; PEREIRA, D.; VERÍSSIMO, A. **O estado da Amazônia: uso da terra**. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON). Belém, PA, 2013.

SHERMAN, L.K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News Record**, 108, p.501–505, 1932.

SILVA, F. Q. A Gestão dos recursos hídricos após a Lei 9.433, de 08.01.1997. In: FREITAS, V. P. (Org.). **Direito Ambiental em evolução**. Curitiba: Juruá, p.83, 1998.

SILVA, F. H. B. B. da; SILVA, M. S. L.; CAVALCANTI, A. C. **Descrição das principais classes de solos**. UEP/Recife. EMBRAPA, 2005.

SILVA, J. F. et al. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, 33(4): 536-548, 2006.

SILVA, P. A. **Classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras segundo o método Pfafstetter, com uso de geoprocessamento.** ENCUENTRO DE LAS AGUAS, 2, 1999, Montevideo. Proceedings... Montevideo, URUGUAY: IICA, 1999. (<http://www.iica.org.uy>)

SINGH, J.; KNAPP, H.V.; DEMISSIE, M. Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08; **Illionois State Water Survey.** Champaign, IL, USA, 2004.

SOBRINHO, T. A. *et al.* Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p.46-57, 2010.

SOUSA, M. M., OLIVEIRA, W. Análise morfológica da rede de drenagem do alto Juruá/ AC, extraída de MDE-SRTM. **Caminhos de Geografia**, v.18, n.61, p.44-64, 2017.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. Am. Geophys. Union**, New Haven, v. 38, p. 913-920, 1957.

STRAHLER, A. N. Dimensional analysis applied to fluvial eroded landforms. **Geological Society of America Bulletin**, v.69, p.279-300, 1958.

SWAROWSKY, A. *et al.* Catchment-Scale Soil Water Dynamics in a Mediterranean-Type Oak Woodland. **Vadose Zone Journal**, v. 10, p.800-815, 2011.

TEODORO, V. L. I. *et al.* O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista UNIARA**, n. 20, p.137-156, 2007.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões, MG.** Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa – UFV, 69p. 2005.

TORRES, F. T. P.; NETO, R. M.; MENEZES, S. O. **Introdução à geomorfologia.** São Paulo: Cengage Learning, 2012.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia. Ciência e aplicação.** 3.ed., primeira reimpressão. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2004.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Modelos hidrológicos.** Ed. Da Universidade – UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2 ed. Porto Alegre, 2005.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE R. T. Regionalização hidrológica. In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, p.3-13, 2003.

TURCOTTE, R. *et al.* Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, v.240, 2001. p. 225-242.

UDOMBOSO, C. G.; AMAHIA, G.N. Comparative analysis of rainfall prediction using statistical neural network and classical linear regression model. **Journal of Modern Mathematics and Statistics**, v.5. p.66-70, 2011.

VEMA, V., SUDHEER, K. P., CHAUBEY, I. Development of a hydrological model for simulation of runoff from catchments unbounded by ridge lines. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 423-439, 2017.

VERDIN, K. L.; VERDIN, J. P. A topological system for delineation and codification of the earth's river basins. **Journal of Hydrology**, v.218, 1999. p.1-12.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

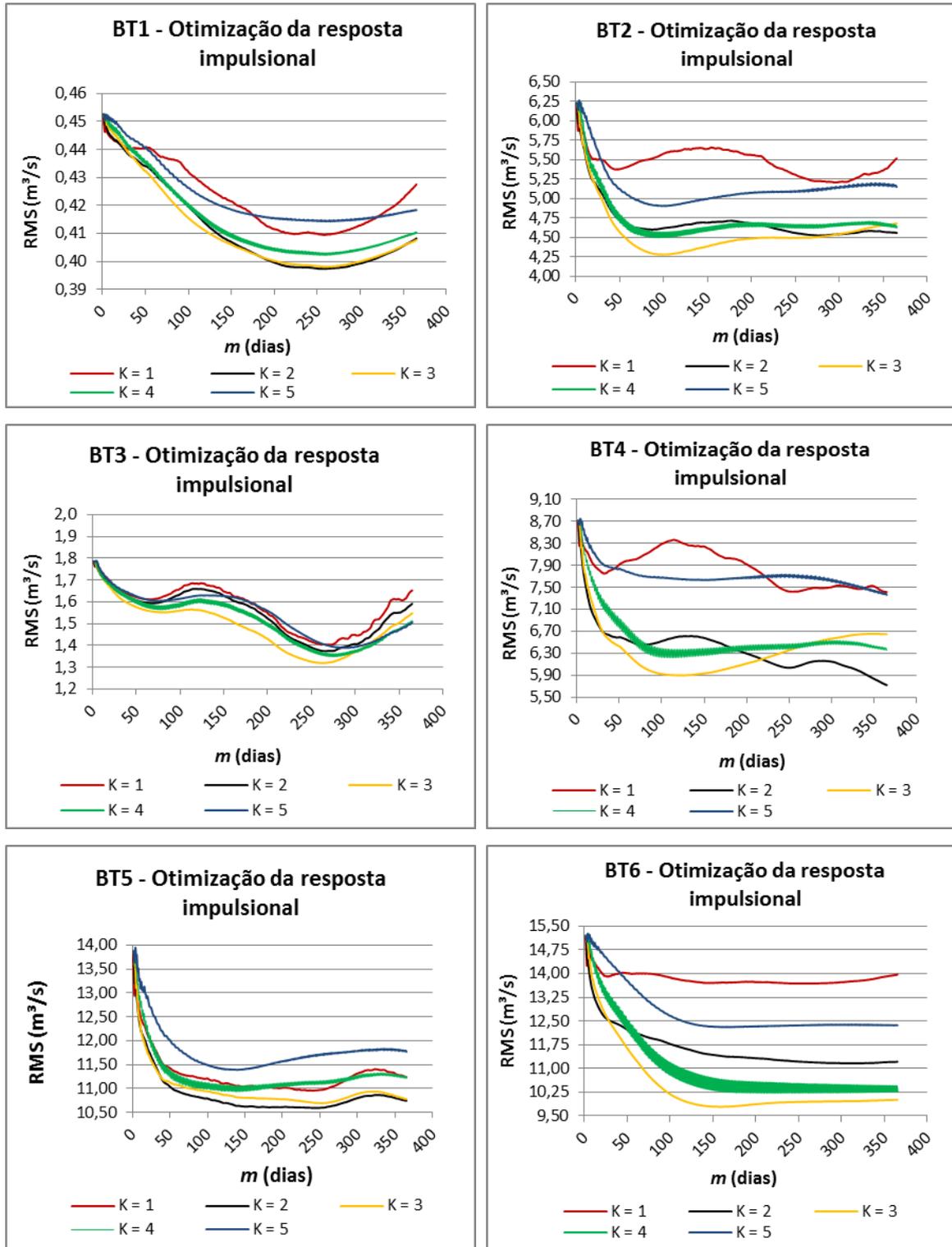
WAGENER, T.; SIVAPALAN, M.; TROCH, P.; WOODS, R. Catchment Classification and Hydrologic Similarity. **Geography Compass**, v.1, (4), p. 901–931, 2007.

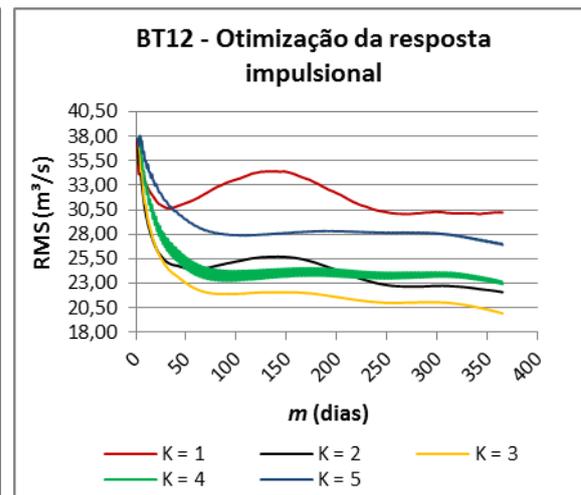
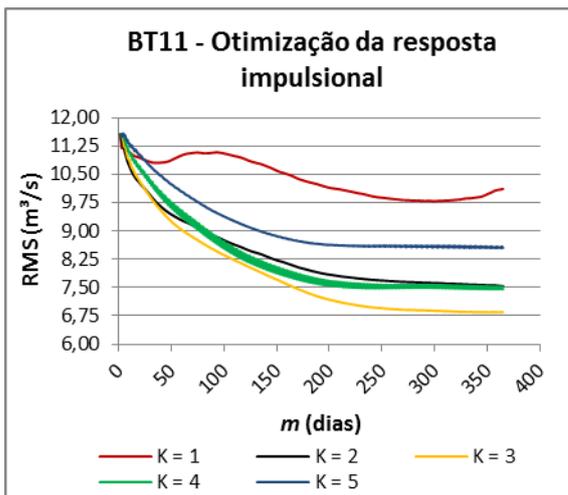
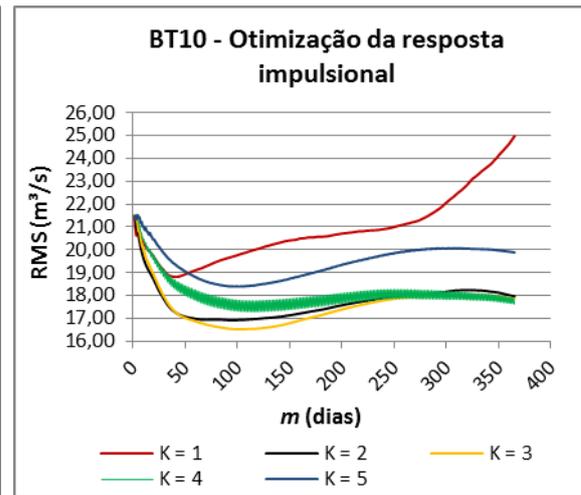
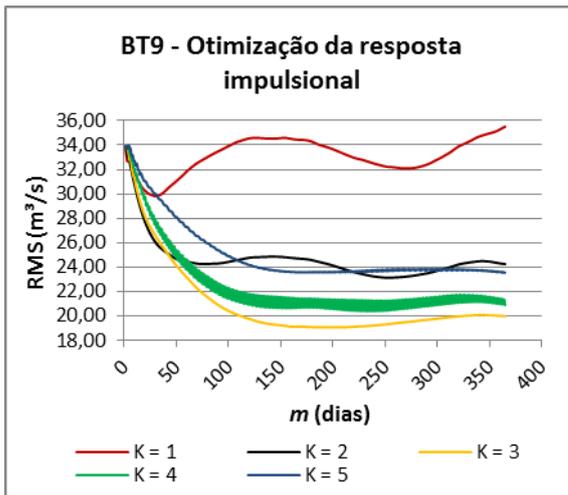
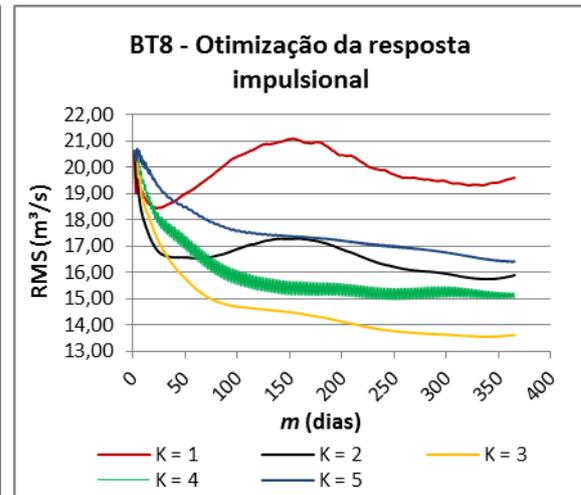
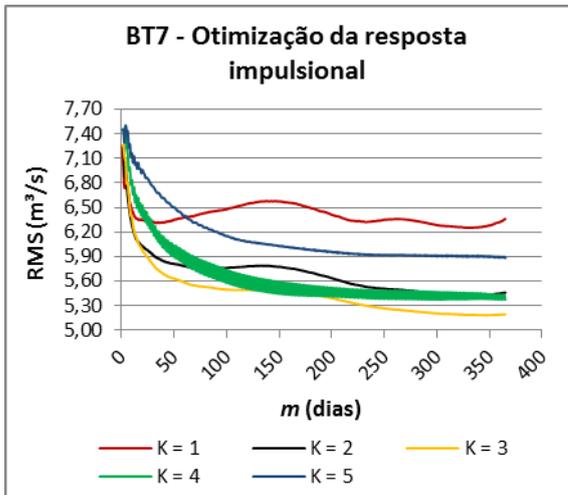
APÊNDICE I - DADOS DAS BACIAS TESTES E DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NO ESTUDO

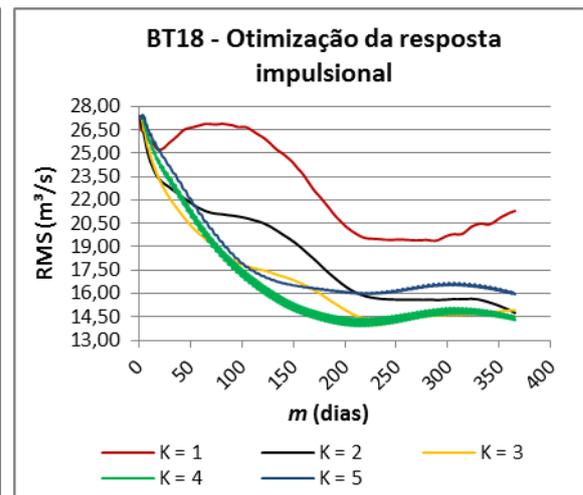
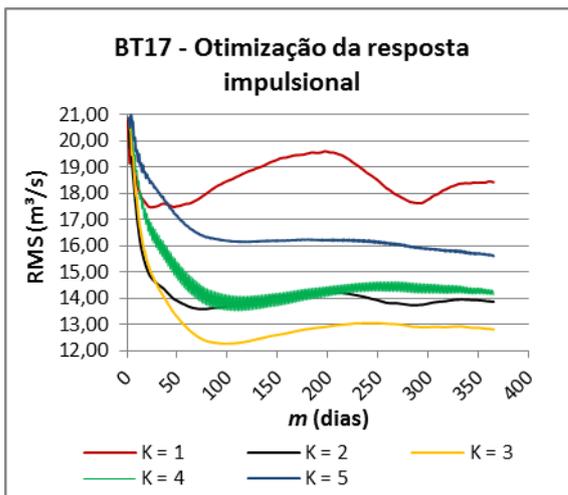
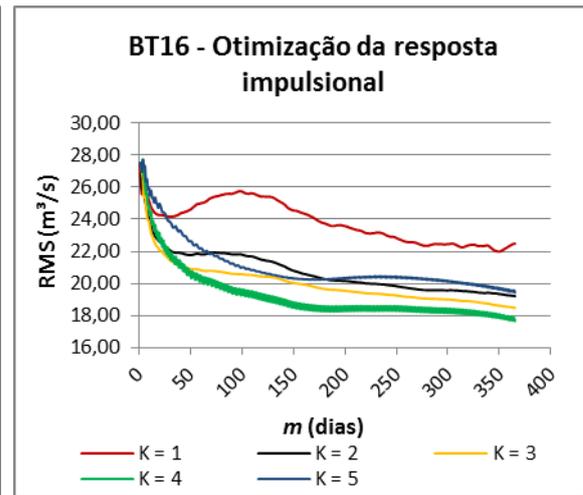
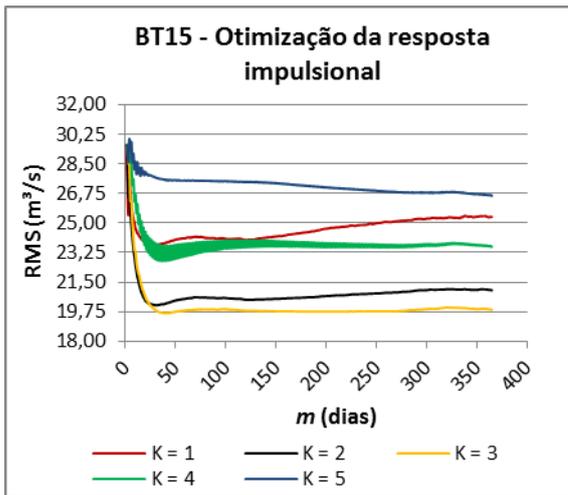
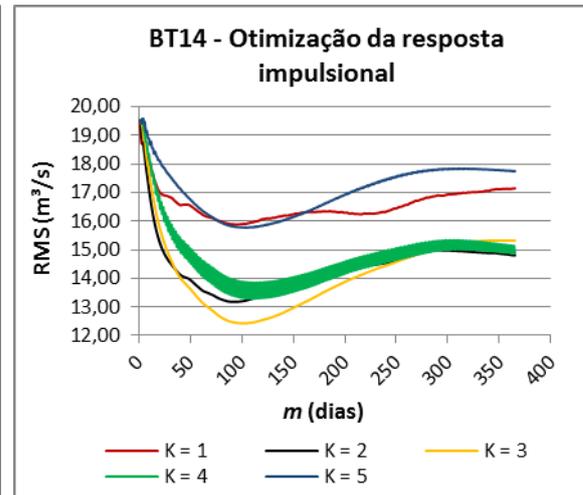
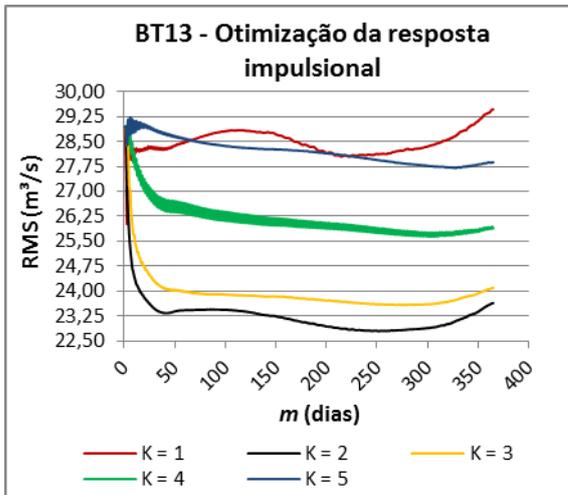
Bacia Teste	Nome	Estado	Área de Drenagem (km ²)	Estação Fluviométrica (código)	Latitude	Longitude	Estação Pluviométrica (código)	Latitude	Longitude
BT1	Marambaia	PA	32,7	31600000	1° 39' 8"	47° 7' 0"	00147016	1° 33' 6"	47° 7' 2"
BT2	Fazenda Craveiro	TO	186	27370000	9° 36' 13"	48° 58' 15"	00949000	9° 37' 28"	49° 9' 19"
BT3	Arraial	PA	290	32300000	1° 19' 0"	47° 7' 0"	00147000	1° 33' 0"	47° 7' 0"
BT4	Próximo Colinas de Tocantins	TO	386	23130000	8° 4' 9"	48° 27' 6"	00848000	8° 3' 10"	48° 28' 54"
BT5	Base do Cachimbo	PA	465	17345000	9° 21' 32"	54° 54' 14"	00855000	8° 11' 14"	55° 7' 10"
BT6	Missão Auaris-Jusante	RR	621	14485010	4° 0' 11"	64° 19' 29"	08464001	4° 0' 11"	64° 19' 29"
BT7	UHE Manso Rio Quilombo	MT	693	66174000	15° 12' 49"	55° 38' 28"	01555010	15° 12' 49"	55° 38' 28"
BT8	São Pedro	AP	735	19200000	0° 27' 8"	52° 4' 11"	00052003	0° 27' 24"	52° 4' 39"
BT9	Maici-Mirim	AM	735	15660000	7° 37' 54"	62° 39' 46"	00762002	7° 37' 51"	62° 39' 48"
BT10	Mineração Ponte Massangana	RO	852	15432000	9° 45' 39"	63° 17' 15"	00963009	9° 28' 0"	63° 15' 0"
BT11	Rio Preto da Eva	AM	976	15042000	2° 41' 56"	59° 42' 13"	00259004	2° 42' 1"	59° 41' 59"
BT12	Cachimbo	MT	1010	17350000	9° 49' 2"	54° 53' 9"	00954001	9° 49' 7"	54° 53' 11"

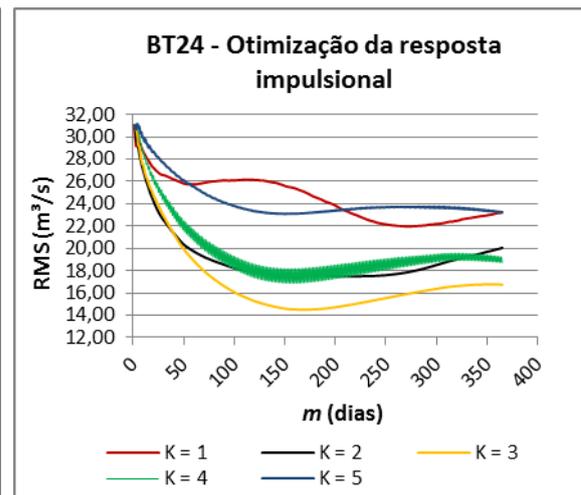
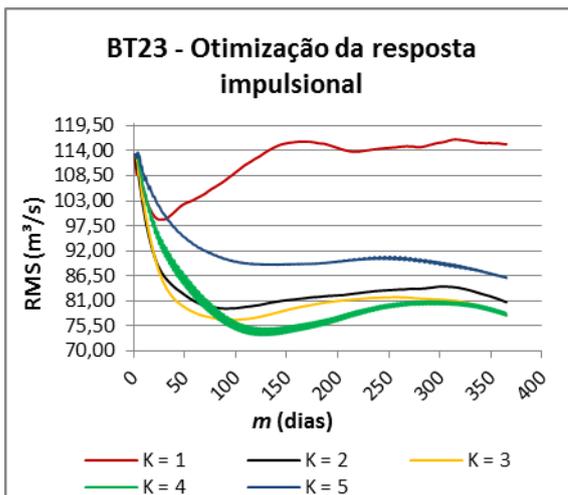
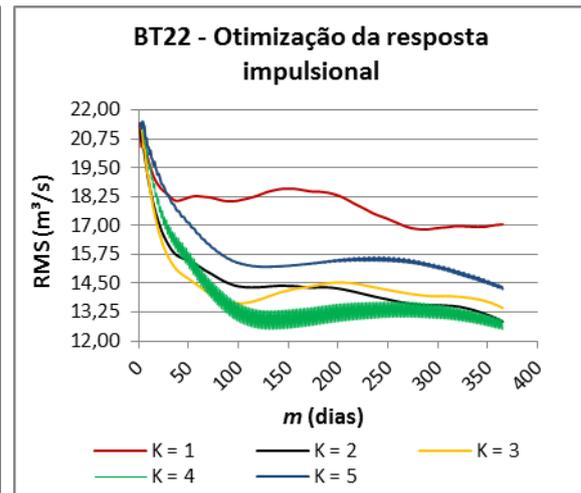
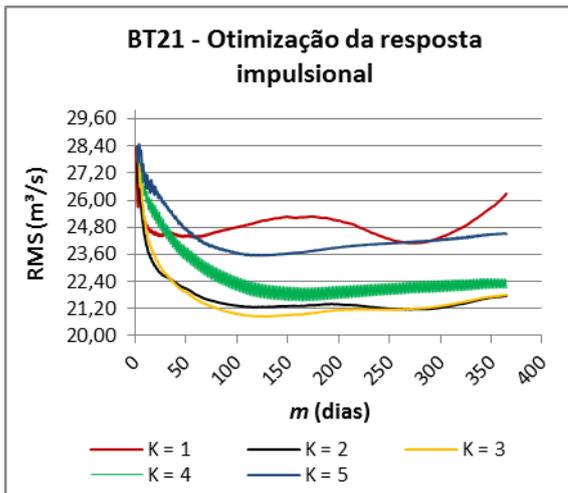
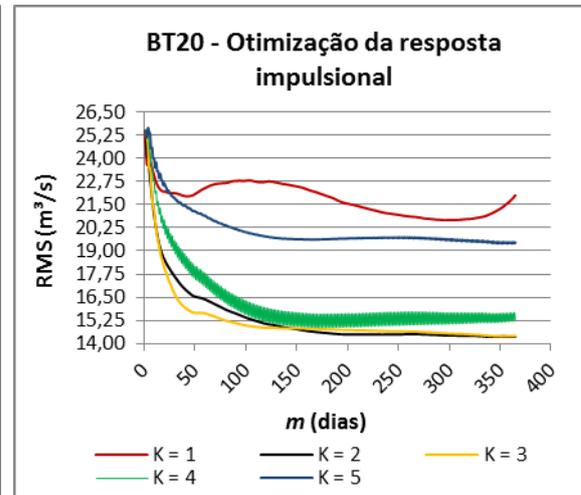
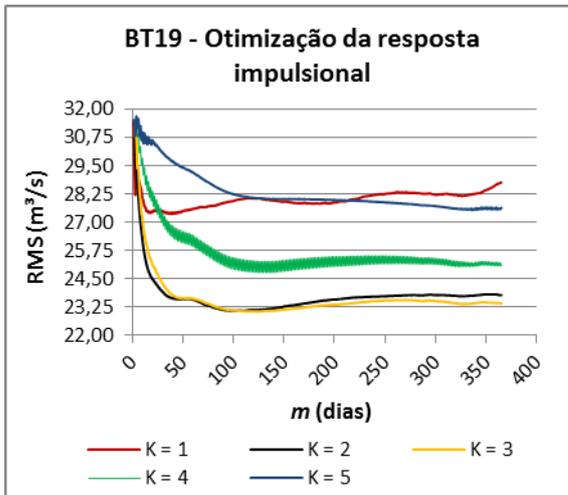
BT13	Serra do Moa	AC	1030	12400000	7° 26' 48"	73° 39' 52"	00773000	7° 26' 8"	73° 39' 8"
BT14	Seringal São Luiz	RO	1050	15245000	11° 4' 0"	64° 5' 0"	01164000	11° 4' 0"	64° 5' 0"
BT15	Maloca Ailan	RR	1090	14560000	4° 38' 0"	60° 11' 0"	08460000	4° 38' 0"	60° 11' 0"
BT16	Nova Mocajuba	PA	1130	32350000	1° 16' 22"	46° 53' 22"	00146013	1° 15' 0"	46° 52' 0"
BT17	Arapoema	TO	1150	27550000	7° 36' 49"	49° 2' 43"	00749000	7° 39' 19"	49° 3' 54"
BT18	Mineração Jacundá	RO	1200	15590000	9° 10' 44"	62° 57' 8"	00962001	9° 10' 45"	62° 57' 11"
BT19	Jauquara	MT	1310	66008000	15° 10' 1"	57° 5' 2"	01557001	15° 4' 36"	57° 10' 57"
BT20	Muricilândia	TO	1580	28150000	7° 8' 43"	48° 36' 37"	00748003	7° 9' 16"	48° 36' 11"
BT21	Nortelândia	MT	1600	66006000	14° 27' 6"	56° 48' 51"	01456003	14° 27' 4"	56° 48' 51"
BT22	Ponte Rio Piranhas	TO	1660	27380000	9° 11' 2"	49° 22' 39"	00949001	9° 15' 26"	49° 3' 51"
BT23	Fazenda Boa Esperança	AM	1720	12875000	5° 14' 0"	66° 35' 0"	00566000	5° 7' 32"	66° 17' 48"
BT24	Bernardo Sayão	TO	1790	27530000	7° 52' 35"	48° 52' 44"	00748001	7° 52' 40"	48° 52' 43"
BT25	Sete Ilhas	PA	1800	32400000	1° 51' 29"	46° 42' 32"	00146005	1° 43' 59"	46° 35' 56"
BT26	Tartarugal Grande	AP	1810	30075000	1° 23' 52"	50° 55' 30"	08150001	1° 23' 52"	50° 55' 25"

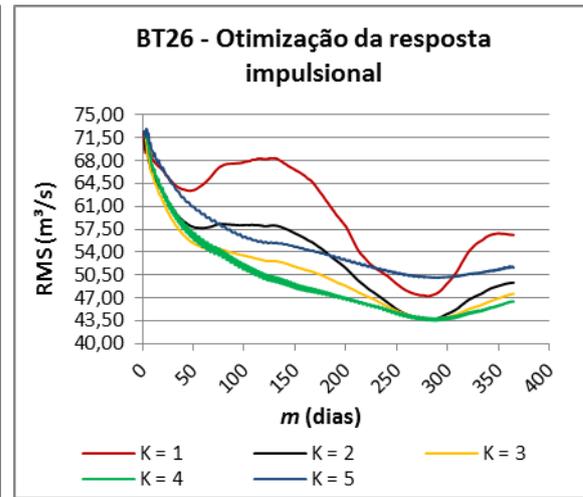
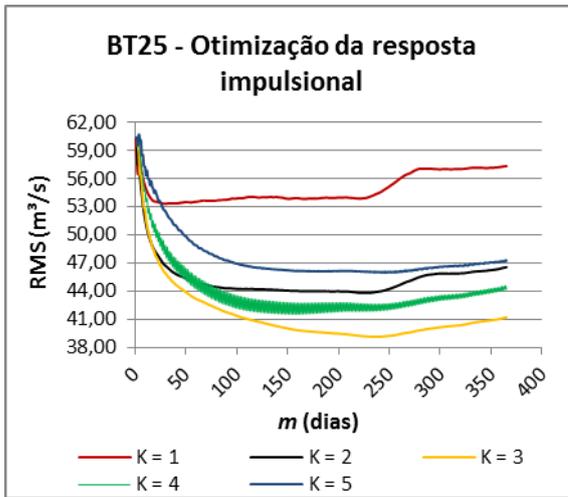
APÊNDICE II – CURVAS DA OTIMIZAÇÃO DO COMPRIMENTO M DA RESPOSTA IMPULSIONAL DO MODELO LINEAR SIMPLES.











APÊNDICE III – HIDROGRAMAS DIÁRIOS E CURVAS DE PERMANÊNCIA DA CALIBRAÇÃO DO MLS NAS BACIAS TESTES.

